



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Mecânica

Cícero Pereira Carvalho Júnior

Modelo de otimização aplicado ao balanço  
econômico da cogeração de energia, produção  
de álcool e açúcar na indústria canavieira

CAMPINAS  
2016

Cícero Pereira Carvalho Júnior

# Modelo de otimização aplicado ao balanço econômico da cogeração de energia, produção de álcool e açúcar na indústria canavieira

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Ieda Geriberto Hidalgo.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO CÍCERO PEREIRA CARVALHO JÚNIOR, E ORIENTADA PELA PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. IEDA GERIBERTO HIDALGO

  
.....  
ASSINATURA DA ORIENTADORA

CAMPINAS  
2016

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** CAPES, 33003017

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

C253m Carvalho Júnior, Cícero Pereira, 1986-  
Modelo de otimização aplicado ao balanço econômico da cogeração de energia, produção de álcool e açúcar na indústria canavieira / Cícero Pereira Carvalho Júnior. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Ieda Geriberto Hidalgo.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Planejamento de produção. 2. Cana-de-açúcar - Indústria. 3. Energia elétrica - Cogeração. 4. Otimização. 5. Programação linear. I. Hidalgo, Ieda Geriberto, 1976-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Optimization model applied to the economic balance of energy cogeneration, alcohol and sugar production in the sugarcane industry

**Palavras-chave em inglês:**

Production planning

Sugarcane - Industrial

Electricity - Cogeneration

Optimization

Linear programming

**Área de concentração:** Planejamento de Sistemas Energéticos

**Titulação:** Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos

**Banca examinadora:**

Ieda Geriberto Hidalgo [Orientador]

Ronilton Evandro Machado

Guilherme Palermo Coelho

**Data de defesa:** 15-12-2016

**Programa de Pós-Graduação:** Planejamento de Sistemas Energéticos


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA  
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO


Modelo de otimização aplicado ao balanço  
econômico da cogeração de energia, produção  
de álcool e açúcar na indústria canavieira

Autor: Cícero Pereira Carvalho Júnior

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ieda Geriberto Hidalgo

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

  
\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ieda Geriberto Hidalgo, Presidente  
Universidade Estadual de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ronalton Evandro Machado  
Universidade Estadual de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Guilherme Palermo Coelho  
Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 15 de dezembro de 2016.

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, esposa e sobrinha.

## Agradecimentos

À professora Ieda Geriberto Hidalgo pela orientação, paciência, dedicação, incentivo, confiança e cumplicidade demonstrados ao longo desta jornada.

Ao professor Paulo de Barros Correia pelo carinho e direcionamento nos estudos.

Aos professores Guilherme Palermo Coelho e Ronalton Evando Machado pela disposição e contribuição.

Aos meus pais, esposa e familiares pelo apoio e amor incondicional.

Aos professores André Franscechi de Angelis, Aníbal Tavares de Azevedo, Luiz Henrique Antunes Rodrigues, Marcelo Pereira Cunha, Joaquim Eugênio Abel Seabra, Arnaldo César Walter pelo auxílio na proposta do trabalho, sugestões e aprendizado.

Aos professores Carlos Alberto Líberi e Laércio Claro Pereira Franco, pela amizade.

Aos companheiros de pesquisa Astrid Lorena, Carla Tiozo, Carolina Sandoval Meiji, Daniel Duft, Elisa Bastos, Fernanda Kazama, Laura Granada, Natália Addas, Paulo Gustavo Nunes, Pedro Drumond Júnior, Pedro Verdezoto, Rafael Capaz, Rafaella Lammoglia, Regiane Barros, Ronaldo Oliveira e Viviana Contreras.

À Pedro Meloni pelo auxílio e compreensão. Aos funcionários e colegas da Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas S/A.

Aos docentes e demais colaboradores da Faculdade de Engenharia Mecânica.

À usina Ferrari pela receptividade.

À CAPES pelo apoio Financeiro.

*Ter a firme convicção de que o mundo estará ao teu lado,  
enquanto te mantiveres leal ao que há de melhor em ti.*

Carlos Gracie

## Resumo

CARVALHO JÚNIOR, Cícero Pereira. Modelo de otimização aplicado ao balanço econômico da cogeração de energia, produção de álcool e açúcar na indústria canavieira. 2016. 95 p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

A flexibilidade da composição do *mix* de produção em indústrias sucroalcooleiras possibilita aos produtores de cana-de-açúcar alternar as decisões quanto à quantidade de açúcar, álcool e energia elétrica a ser produzida. Estas decisões podem ser guiadas pelo mercado e/ou por contratos de longo prazo estabelecidos em financiamentos do setor agroindustrial. O açúcar é um produto que faz parte da cesta básica além de ser uma *commodity* negociada no mercado nacional e internacional. O álcool é um produto direcionado, em grande parte, ao mercado de combustíveis. A aquisição de eletricidade excedente passou a ser, nos últimos anos, uma nova meta para o setor energético das usinas, bem como oportunidade de incrementar os ganhos. Esta dissertação apresenta um modelo de otimização aplicado ao balanço econômico da cogeração de energia, produção de álcool e açúcar na indústria canavieira. O objetivo é maximizar o lucro econômico recorrente da empresa, ou seja, a diferença entre as receitas e os custos no período de uma safra. O modelo é executado no Lingo, *software* para programação inteira, linear, não linear, estocástica e global. As restrições de demanda de cada *commodity* e de energia para a produção, assim como os limites de cada recurso são levados em consideração. As relações que convertem recurso em *commodity* e recurso em energia, bem como as demandas de energia térmica, mecânica e elétrica durante o processo industrial são apresentadas. O objeto de estudo desta pesquisa é o complexo Agroindustrial Ferrari, localizado em Pirassununga. Seis produtos são comercializados pela empresa: açúcar VHP, açúcar VVHP, etanol anidro, etanol hidratado, energia elétrica e levedura seca. A Usina é cooperada da Coopersucar, onde são comercializados 100 % da sua produção de açúcar e etanol. A energia elétrica excedente é negociada no mercado financeiro de curto prazo, também chamado de mercado *spot*, do setor elétrico brasileiro. Três estudos de caso são apresentados. O primeiro utiliza dados extraídos da literatura e preços atuais de mercado. No segundo estudo de caso o modelo é alimentado com dados da indústria Ferrari. No terceiro, faz-se uma análise de sensibilidade variando alternativamente os preços das *commodities*. Ao impulsionar os preços de venda da eletricidade excedente, o *mix* aproxima-se da produção etílica. A produção açucareira além de consumir mais eletricidade, direciona parte do vapor de processo para a produção de álcool a partir do melaço, proporcionando a produção conjunta dos derivados, porém diminuindo a parcela de vapor disponível para a cogeração.

**Palavras-chave:** Planejamento de produção, Cana-de-açúcar - Indústria, Energia elétrica - Cogeração, Otimização, Programação linear.



## Abstract

CARVALHO JÚNIOR, Cícero Pereira. Optimization model applied to the economic balance of energy cogeneration, alcohol and sugar production in the sugarcane industry. 2016. 95p. Masters Thesis. Mechanical Engineering Faculty, State University of Campinas, Campinas.

The flexibility of the composition of the production *mix* in the sugar and ethanol industries enables sugarcane producers to alternate decisions on the amount of sugar, alcohol and electricity to be produced. These decisions may be market-driven and / or long-term contracts established in agroindustrial sector financing. Sugar is a product that is part of the basic basket, besides being a *commodity* traded in the national and international markets. Alcohol is a product directed, in large part, to the fuel market. The acquisition of surplus electricity has become, in recent years, a new goal for the power sector of the plants, as well as an opportunity to increase the gains. This dissertation presents an optimization model applied to the economic balance of energy cogeneration, alcohol and sugar production in the sugarcane industry. The goal is to maximize the economic profit schedule of the company, i.e. the difference between revenues and costs. The model runs on Lingo, software for integer programming, linear, nonlinear, stochastic and global. The demand constraints of each *commodity* and energy for production, as well as the limits of each resource are taken into account. Relationships that convert resource into commodity and resource into energy, as well as the demands of thermal, mechanical and electrical energy during the industrial process are presented. The study object of this research is the complex Agroindustrial Ferrari, located in Pirassununga. Six products are marketed by the company: VHP sugar, VVHP sugar, anhydrous ethanol, hydrated ethanol, electric power and dry yeast. The plant is cooperated with Coopersucar, where 100% of its sugar and ethanol production is traded. The surplus electricity is traded in the short-term financial market, also called the Spot market of the Brazilian Electric Sector. Three case studies are presented. The first uses data from the literature and current market prices. In the second case study the model is powered by Ferrari industry data. In the third, a sensitivity analysis is performed alternately varying commodity prices. By boosting the selling prices of surplus electricity, the mix is close to ethyl production. Sugar production, besides consuming more electricity, directs part of the process steam to the production of alcohol from molasses, providing the joint production of the derivatives, but decreasing the amount of steam available for cogeneration.

**Key-words:** Production planning, sugarcane - industrial, electricity - cogeneration, optimization, linear programming

# Lista de Figuras

1.1	Oferta interna de energia elétrica por fonte . . . . .	17
2.1	Combinações de caminhão e reboque mais comuns utilizadas no transporte da cana . . . . .	31
2.2	Fluxo genérico do processo de fabricação de açúcar . . . . .	34
2.3	Fluxo genérico do processo de fabricação do álcool . . . . .	36
2.4	Fluxograma geral do processo de fabricação do açúcar e álcool . . . . .	37
2.5	Evolução da série histórica dos preços, R\$/ton, do açúcar do tipo VHP no período entre 2007 e 2016 . . . . .	42
2.6	Evolução da série histórica dos preços, em R\$/m <sup>3</sup> , do etanol anidro (AEAC) e hidratado (AEHC) no período entre 2007 e 2016 . . . . .	44
2.7	Evolução da série histórica do PLD, em R\$/MWh, no período entre 2007 e 2016 . . . . .	46
2.8	Preço das <i>commodities</i> açúcar VHP (R\$/ton), AEAC (R\$/m <sup>3</sup> ), AEHC (R\$/m <sup>3</sup> ) e PLD (R\$/MWh) no período entre 2007 e 2016 . . . . .	47
3.1	Processo da Pesquisa Operacional . . . . .	49
3.2	Fronteiras do sistema . . . . .	51
3.3	MPI, Simplex e ótimo . . . . .	60
4.1	Diagrama da produção sucroenergética na Usina Ferrari . . . . .	64
4.2	Diagrama de fluxo de processo do complexo Ferrari . . . . .	70

# Lista de Tabelas

2.1	Composição média da cana-de-açúcar das principais variedades brasileiras.	28
2.2	Constituintes da cana-de-açúcar. . . . .	28
4.1	Variáveis de saída do modelo . . . . .	74
5.1	Parâmetros do modelo . . . . .	76
5.2	Variáveis de entrada do modelo . . . . .	76
5.3	Dados de saída do modelo obtidos para o primeiro cenário . . . . .	77
5.4	Valor do custo, em R\$/ton ou m <sup>3</sup> das <i>commodities</i> em função do tipo de recurso . . . . .	78
5.5	Dados de entrada do modelo obtidos para o segundo cenário . . . . .	79
5.6	Dados de saída do modelo obtidos para o segundo cenário . . . . .	79
5.7	Dados de entrada e valores de saída obtidos para o terceiro estudo de caso	80
5.8	Dados de entrada e saída do modelo obtidos para o terceiro cenário considerando o PLD . . . . .	81
0.1	Dados de entrada do modelo obtidos para o primeiro cenário . . . . .	95

# Lista de Acrônimos

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
AEAC	Álcool Etílico Anidro Carburante
AEHC	Álcool Etílico Hidratado Carburante
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ART	Açúcares Redutores Totais
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CMO	Custo Marginal da Operação
Coopersucar	Cooperativa de Produtores de Cana, Açúcar e Energia do Estado de São Paulo Ltda
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
Consecana-SP	Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
CTBE	Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa em Agricultura e Pecuária
EMSO	<i>Environment for Modeling, Simulation and Optimization</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FFV	<i>Flexible Fuel Vehicle</i>
GAMS	<i>General Algebraic Modeling System</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLPK	<i>GNU Linear Programming Kit</i>
IAA	Instituto do Açúcar e do Álcool
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
LEN	Leilão de Energia Nova
LER	Leilão de Energia de Reserva
Lindo	<i>Linear Interactive and Discrete Optimizer</i>
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MPI	Método dos Pontos Interiores
O&M	Operação e Manutenção
PBC	Planta Básica de Configuração
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PE	Ponto Extremo
PIB	Produto Interno Bruto
PL	Programação Linear
Planalsucar	Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças

PO	Pesquisa Operacional
Proálcool	Programa Nacional do Alcool
Proinfa	Programa de Incentivo às Fontes Renováveis de Energia
SBV	Solução Básica Viável
SIN	Sistema Interligado Nacional
SP	São Paulo
SPD	Sistema de Plantio Direto
TIR	Taxa Interna de Retorno
USAF	<i>United States Air Force</i>
UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
VHP	<i>Very High Polarization</i>
VVHP	<i>Very Very High Polarization</i>
VPL	Valor Presente Líquido

# Sumário

1	Introdução . . . . .	15
1.1	Planejamento da operação industrial canavieira . . . . .	16
1.2	Revisão de literatura . . . . .	19
1.3	Objetivos e contribuições . . . . .	25
1.4	Estrutura capitular . . . . .	26
2	Cultura da cana-de-açúcar . . . . .	27
2.1	Caracterização da biomassa como energético . . . . .	27
2.2	Processamento industrial da cana-de-açúcar no Brasil . . . . .	30
2.3	Análise da comercialização dos produtos do setor sucroalcooleiro brasileiro . . . . .	40
3	Tópicos de Pesquisa Operacional . . . . .	48
3.1	Introdução à Pesquisa Operacional . . . . .	48
3.2	Programação Linear . . . . .	52
3.3	Exemplos de modelos em PL . . . . .	54
3.4	Método dos pontos interiores . . . . .	59
3.5	Linguagem de modelagem Lingo . . . . .	61
4	Metodologia . . . . .	63
4.1	Descrição e caracterização do objeto de estudo . . . . .	63
4.2	Modelo matemático . . . . .	69
5	Estudos de casos e análise de resultados . . . . .	75
5.1	Premissas adotadas e dados de entrada e saída do modelo . . . . .	75
5.2	Dados da literatura e preços atuais de mercado . . . . .	76
5.3	Dados do complexo Agroindustrial Ferrari . . . . .	78
5.4	Análise de sensibilidade variando alternativamente os preços das <i>commodities</i> . . . . .	80
6	Conclusões e trabalhos futuros . . . . .	82
6.1	Resumo e conclusões . . . . .	82
6.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	84
	<b>Referências</b>	<b>89</b>
	<b>ANEXO A - Código em Lingo</b>	<b>90</b>
	<b>ANEXO B - Projeto.txt</b>	<b>94</b>
	<b>ANEXO C - Primeiro cenário</b>	<b>95</b>

# 1 Introdução

Não se sabe com exatidão qual a origem da cana-de-açúcar no mundo. Historiadores estimam que o surgimento desta gramínea ocorreu aproximadamente 10 mil anos atrás, em regiões remotas da Ásia. Na China, a cultura foi introduzida por volta de 800 a.C. e seu aproveitamento como açúcar ocorreu 400 anos depois, num processo rudimentar que consistia em esmagar e ferver o bastão da cana para dar origem ao melaço. Alguns séculos mais tarde, por volta de 700 d.C., o açúcar cru passou a ser comercializado e utilizado como moeda de troca em algumas civilizações, sobretudo no ocidente.

A introdução da cana-de-açúcar no Novo Mundo se deve a Cristóvão Colombo, que trouxe, em sua segunda viagem, algumas mudas para a América Central. O plantio e expansão canavieira foram bem aceitos, e a região das Antilhas tornou-se o foco de irradiação desta cultura para o restante do continente. Ainda no século XVI, a cana chegou ao Brasil por ordem do rei D. Manuel e foi introduzida na Capitania de São Vicente pelo governador-geral Martim Afonso de Sousa, dando início ao “Ciclo do Açúcar” (SEABRA, 2008).

A cana-de-açúcar foi uma das primeiras culturas a serem exploradas comercialmente no Brasil, com o objetivo principal de fornecer açúcar para corôa Portuguesa, e caracterizou-se pelo latifúndio, escravidão e monocultura, o chamado “*plantation*”. Em 1600, o país se tornou o maior produtor mundial de açúcar, posto perdido alguns séculos mais tarde para o Caribe e países europeus por conta do aumento de produção nas regiões tropicais e desenvolvimento tecnológico da obtenção do açúcar a partir da beterraba no velho continente. Durante os séculos seguintes, a produção açucareira atravessou várias fases, incluindo crescimento, consolidação e crises econômicas.

De 1930 à 1980, a economia brasileira apresentou taxa média de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) em torno de 7% ao ano e sua estrutura produtiva diversificou-se amplamente, adequando-se aos ditames do Projeto Nacional Desenvolvimentista. Em 1933 foi criado o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) com o objetivo de regulamentar as relações entre as principais categorias sociais envolvidas no complexo sucroalcooleiro, como usineiros, agricultores, trabalhadores e governo. Nesse período, a produção de álcool mantinha uma importância secundária, embora de tempos em tempos fosse considerada como válvula de escape às crises do mercado de açúcar. Desde a década de 1930, havia uma legislação que estabelecia um volume mínimo de 5% de álcool a ser adicionado à gasolina.

A concorrência acirrada no mercado mundial de açúcar e a insegurança em relação ao abastecimento mundial do petróleo, com duas graves crises no século XX, levaram o Brasil a ampliar a produção de álcool combustível, dando grande impulso na

produção de cana. Em 1975 o Governo Federal instituiu o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), com o objetivo de estimular a produção de álcool para substituir a gasolina nos motores de combustão interna (ciclo Otto). Com o surgimento deste programa de fomento, o Brasil tornou-se líder mundial na produção da cana-de-açúcar, praticamente dobrando a quantidade de etanol produzido. Foram instaladas destilarias de álcool no país, inclusive algumas foram incorporadas às fábricas de açúcar já existentes. O objetivo governamental de um rápido crescimento do Proálcool aliado à facilidade de obtenção de subsídios para aumentar a capacidade produtiva do complexo canavieiro facilitaram a criação de uma grande indústria do álcool no país. Baccarin (2005) afirma que durante este período as ações públicas para o complexo sucroalcooleiro deixaram de se vincular a uma política agrícola para determinado ramo econômico e passaram a constituir um componente da política energética nacional.

A desregulamentação do setor sucroalcooleiro fez parte de um processo amplo de afastamento do Estado da economia brasileira, iniciado no Governo Collor nos anos 1990. A crise fiscal enfrentada pelo país desde os anos 1980 reduziu a capacidade de atuação do governo como coordenador ou indutor na atividade econômica, fazendo emergir, no início da década seguinte, um processo de liberações e privatizações de importantes setores da economia, dentre os quais a descontinuidade do IAA. O afastamento do Estado e a complexidade presente na cadeia produtiva da cana-de-açúcar evidenciaram algumas questões bastante importantes, dentre elas, qual deve ser a nova forma de atuação do poder público e dos agentes privados em ambiente de livre mercado. A partir deste novo paradigma, o desenvolvimento de um modelo de gestão para o setor, bem como o planejamento e a adequação das atividades agroindustriais, passou a ser evidente e estritamente necessário. Dentre as novas oportunidades surgidas, destacam-se a cogeração de energia elétrica e o mercado de carbono (MORAES; SHIKIDA, 2002).

## 1.1 Planejamento da operação industrial canavieira

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a produção de cana-de-açúcar no ano civil 2014 alcançou 631,8 milhões de toneladas. Em 2013, a produção nacional de açúcar foi de 35,4 milhões de toneladas, enquanto a produção de etanol atingiu um total de aproximadamente 28.526 mil metros cúbicos. A biomassa, com participação de 23,8 % na matriz energética, foi a segunda principal fonte de energia, superada apenas pelo petróleo e seus derivados. A biomassa, conforme pode ser visto na Figura 1.1, ocupou a terceira posição entre as fontes de energia elétrica, respondendo por 7,3 % da oferta (EPE, 2015).



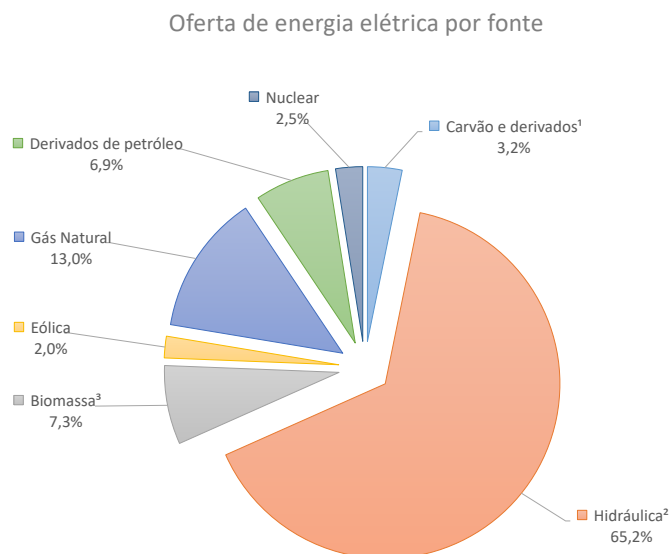


Figura 1.1: Oferta interna de energia elétrica por fonte  
Fonte: EPE (2015)

A cana-de-açúcar apresenta uma das maiores taxas de conversão fotossintética entre as culturas comerciais de grande escala. O Brasil, hoje, é o país mais competitivo entre todos, tanto na produção de cana quanto de seus derivados. Isto é conseguido sem irrigação, e em condições favoráveis de sustentabilidade nos aspectos ambientais. Vários fatores contribuem para esta produtividade, dentre os quais se destacam o esforço de desenvolvimento tecnológico desde 1975, a sinergia na produção conjunta de açúcar e etanol e um grande avanço gerencial nas unidades produtoras (SEABRA, 2008).

A flexibilidade da produção é uma das mais importantes características da indústria sucroalcooleira. As usinas que possuem destilarias anexas podem direcionar o caldo de cana oriundo da moagem para a produção de açúcar ou para a produção de álcool, enquanto o bagaço, também resultante da moagem, é conduzido para o reaproveitamento nas caldeiras. A quantidade de caldo destinado para cada um dos produtos dependerá da estratégia de comercialização adotada por cada unidade produtora.

Essa versatilidade na composição do *mix* é um instrumento que possibilita aos produtores redirecionarem sua produção frente aos sinais do mercado, isto é, frente aos possíveis ganhos para a produção de açúcar e álcool. Os agentes decisores formam expectativas com relação aos preços esperados e às quantidades demandadas de derivados. Contudo, se por um lado o mercado pode guiar as decisões empresariais, por outro, as decisões não devem ser desvinculadas de um planejamento a longo prazo de cada unidade, pois grande parte dos financiamentos do setor são realizados pela assinatura de contratos de longo prazo de fornecimento para as grandes *traders* que atuam em território nacional, ou em alguns casos internacional (LAMOUNIER et al., 2006).

O açúcar é um produto que faz parte da cesta básica além de ser uma *commodity* negociada no mercado à vista e futuro nacional e internacional. Já o álcool é um produto direcionado, em grande parte, ao mercado de combustíveis. A aquisição de eletricidade excedente passou a ser, nos últimos anos, uma nova meta para o setor energético das usinas, bem como oportunidade de incrementar os ganhos. Qualquer variável relevante desses mercados, que são bastante distintos, deve ser considerada na definição do *mix* de produção.

Atualmente a decisão de produzir açúcar e álcool, é tomada pelos empresários do setor que, de forma geral, consideram como critérios de decisão os preços relativos dos produtos. Embora a eletricidade faça parte do planejamento das usinas, ela não concorre diretamente com a produção dos outros derivados. Dessa forma, a possibilidade de escolha entre açúcar e álcool, principais produtos da agroindústria, torna a decisão sobre a oferta bastante complexa, pois envolve vários mercados que se interagem e funcionam como um sistema de vasos comunicantes.

Portanto, o setor sucroalcooleiro é caracterizado pela produção de produtos distintos que possuem mercados diferentes e uma mesma matéria prima para sua composição. Existe um *trade-off* entre produzir açúcar ou produzir etanol no processo de decisão das usinas. A decisão de aumentar a produção de açúcar, dada pela produção constante de cana, afetará, necessariamente, a quantidade de álcool produzida e a decisão de elevar a produção de álcool, dada uma quantidade constante de cana dentro da unidade industrial, interferirá na produção de açúcar. Dessa forma, a análise dos determinantes deste *trade-off* entre açúcar e etanol torna-se importante tanto para o setor produtivo quanto para o mercado. É esse *trade-off* que definirá o *mix* de produção do setor, sendo necessária a análise do comportamento da produção ao longo da safra para compreender o processo decisório de sua definição, principalmente no curto prazo (LAMOUNIER et al., 2006).

Diversas variáveis relativas aos mercados dos principais derivados da cana afetam a composição do *mix* de produção e definem o aumento da quantidade produzida de um produto em detrimento do outro, com exceção da eletricidade que depende tanto das quantidades de bagaço e palha disponíveis quanto das demandas térmicas para ambos os derivados. As variáveis determinantes das demandas internas, bem como as variáveis relativas às demandas externas das *commodities* precisam ser incorporadas na análise.

Assim, o diagnóstico do comportamento do setor canavieiro ao longo da safra com relação à definição do planejamento de produção pelos empresários torna-se muito importante para a decisão alocativa como forma de otimização das receitas desses empreendimentos. Do mesmo modo, o estudo é de grande valia para o governo. Através da análise prospectiva pode-se entender o comportamento do setor produtivo ao longo da

safras frente às variações dos preços tanto do açúcar quanto do álcool e mais recentemente da eletricidade. Dessa forma, pode-se ter a garantia de que não haverá falta desses produtos no mercado brasileiro, principalmente no período de entressafra, possibilitando ao governo atuar junto ao setor enquanto as usinas estiverem em período produtivo.

## 1.2 Revisão de literatura

Esta seção apresenta uma breve revisão literária, destacando os principais métodos e abordagens utilizados para solucionar o problema do planejamento da produção canavieira com enfoque no processamento industrial da cana-de-açúcar, objeto de estudo deste trabalho. Destacam-se os modelos aplicados nas plantas agroindustriais integradas com processo de cogeração, discutindo as principais tecnologias e impactos resultantes no setor.

Scaramucci et al. (2006) usam um modelo de equilíbrio geral para estimar os impactos econômicos da redução na oferta de hidroeletricidade e investigar uma possível integração da eletricidade gerada através do bagaço da cana na matriz energética. O modelo estuda os efeitos da escassez energética nos diversos setores da economia através dos preços, fatores de produção e variações na renda dos agentes envolvidos. Os resultados mostram que a geração de excedentes energéticos na agroindústria canavieira pode atenuar os impactos econômicos negativos nos contextos de crise, fazendo do bagaço, resíduo do processamento da cana, um produto mais importante do que o açúcar e o álcool.

Hofsetz e Silva (2012) investigam a disponibilidade do bagaço da cana para o consumo energético e não energético, avaliando o potencial deste insumo como matéria-prima tanto para a produção de excedentes de eletricidade, a serem disponibilizados nos leilões de energia, quanto na síntese de etanol de segunda geração. Outros usos, como produção de alimentos, também são considerados. Para tanto, os autores investigam, através das bases de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA) e Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), os valores de cana-de-açúcar colhida e processada no período entre 1999 e 2013, além do montante de bagaço disponível. A palha da cana, deixada no campo após a colheita, é outro resíduo que pode ser utilizado para produzir energia elétrica através da cogeração, de forma a garantir maior disponibilidade de bagaço para a produção de etanol celulósico, mitigando o conflito de interesses entre a produção de eletricidade e combustíveis.

Dantas et al. (2013) examinam as configurações tecnológicas mais promissoras para produção de energia a partir bagaço da cana. Os autores apresentam uma avaliação dos custos para cada tecnologia e discutem quais seriam as opções mais atrativas de investimento para a agroindústria canavieira, dadas as produções de biocombustíveis e bioeletricidade. Com exceção da energia elétrica cogerada a partir do ciclo *Rankine*, as

demais rotas tecnológicas estão em início de desenvolvimento e não são comercialmente viáveis.

Dantas (2010) faz uma análise energética, exergetica e ambiental, baseadas nos princípios da Termodinâmica, dos sistemas de geração de energia elétrica em agroindústrias do interior paulista. O autor avalia qual o melhor sistema de aproveitamento dos subprodutos, considerando estudos de caso em duas usinas. As melhores eficiências energéticas foram encontradas na planta agroindustrial que emprega duas caldeiras operando em sistemas de média e alta pressão, tecnologias bem estabelecidas no setor.

Seabra e Macedo (2011) comparam o desempenho técnico-econômico e ambiental da geração de energia elétrica e a produção de etanol a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar, considerando alternativas tecnológicas no curto prazo. Os autores analisam, através de plantas adjacentes às usinas convencionais, configurações de produção de energia elétrica utilizando ciclo *Rankine*<sup>1</sup> comercial, e produção de etanol de segunda geração via sistemas de sacarificação enzimática e fermentação. A rentabilidade econômica de cada opção é comparada em termos do retorno de investimento e os benefícios ambientais são medidos através da redução das emissões dos gases de efeito estufa (GEE). A produção de eletricidade em ciclos de vapor mostra-se economicamente vantajosa no horizonte proposto, enquanto a opção de produção do etanol celulósico é mais efetiva na mitigação dos riscos ambientais e apresenta-se como melhor alternativa a longo prazo.

Furlan et al. (2012) desenvolvem uma ferramenta computacional de otimização global, com a modelagem detalhada de uma biorrefinaria integrada, a fim de avaliar as demandas de processo e encontrar uma solução viável para o conflito de interesses entre a produção de etanol de segunda geração e a autossuficiência energética. Os autores buscam, dentre outros critérios de decisão, quais as quantidades de bagaço devem ser desviadas para rota de produção de vapor e eletricidade, ou síntese de etanol celulósico, dependendo do cenário econômico vigente. Quatro estudos de casos são considerados e simulados em ambiente computacional, a partir do *software Environment for Modeling, Simulation and Optimization* (EMSO). Os resultados demonstram que a produção de etanol de segunda geração aumenta as exigências térmicas e reduz a geração de energia elétrica excedente, impactando diretamente na receita do empreendimento.

Buddadee et al. (2008) propõem um modelo de otimização multi-objetivo, implementado em *software* Lingo, para auxiliar na decisão de utilização do excesso de bagaço nas diversas rotas de produção do complexo canavieiro tailandês. Os autores consideram dois grandes cenários na abordagem adotada: produção de eletricidade em escala local, e produção de etanol *offsite*, sendo este último direcionado para o consumo automotivo. O

---

<sup>1</sup>O ciclo *Rankine* é um ciclo termodinâmico internamente reversível que converte calor em trabalho. Trata-se de um modelo de ciclo para ciclos de potência reais.

modelo compreende a avaliação do ciclo de vida e o custo econômico associado resultante da otimização, definindo as quantidades ótimas de bagaço a ser processado para cada cenário. Levando-se em consideração as mudanças climáticas e as oscilações no preço do petróleo, bem como seu impacto ambiental, os autores concluem que a melhor alternativa naquele país é a produção de maiores quantidades de etanol em relação à energia elétrica.

Illukpitiya et al. (2013) apresentam um modelo de programação linear, elaborado no utilitário *Linear Interactive and Discrete Optimizer* (Lindo), para avaliar as diversas opções de produção de açúcar e biocombustíveis a partir da cana e outros tipos de biomassa no Havaí. Para tanto, os autores buscam as quantidades ideais de derivados a serem obtidas de acordo com cada tipo de matéria-prima que maximizam o lucro dos produtores no complexo agroindustrial. Entretanto, a produção das culturas energéticas requer quantidades substanciais de recursos hídricos, fazendo da disponibilidade de água uma importante restrição para o potencial de geração bioenergética na ilha. A atratividade das culturas energéticas em relação aos combustíveis fósseis depende do balanço energético líquido e do valor das compensações de carbono.

Kostin et al. (2012) propõem uma abordagem estocástica, através de programação linear inteira mista, da sigla em inglês MILP, para o planejamento da cadeia de suprimentos na indústria canavieira argentina. O algoritmo desenvolvido pelos autores em linguagem *General Algebraic Modeling System* (GAMS) e resolvido com o módulo MILP presente no otimizador CPLEX baseia-se na aproximação média amostral e fornece como saída um conjunto de configurações que se comportam de diferentes maneiras face às incertezas na demanda dos derivados da cana. São desenvolvidos dois estudos de caso que diferem entre si na variância da incerteza nas demandas de açúcar e etanol, e cujos resultados apontam para produção geograficamente mais centralizada na Argentina.

Silva et al. (2013) aplicam técnicas de programação inteira multiobjetivo no planejamento agregado da produção, distribuição e cogeração na indústria canavieira. Os autores comparam os resultados obtidos desta técnica com aqueles verificados através da programação por metas (*goal programming*). A metodologia proposta otimiza, a partir do código escrito em GAMS no *solver* CPLEX, todos os objetivos de maneira satisfatória e com boa performance, atenuando os impactos negativos decorrentes das mudanças climáticas na qualidade da cana-de-açúcar.

Grisi et al. (2011) desenvolvem um modelo de MILP para analisar as operações agroindustriais, considerando as funções dos custos de produção e as receitas globais obtidas com a venda de eletricidade e os demais subprodutos da cana-de-açúcar no horizonte de curtíssimo prazo. A formulação matemática adotada permite simular e analisar a operação industrial ideal em diversos cenários por meio de estudos de caso com base em dados da literatura e informações advindas de usinas. A metodologia emprega a produção

horária simultânea de açúcar, álcool e eletricidade. O modelo, codificado em GAMS, é baseado numa série de funções lineares em conjunto com restrições inteiras que formulam as peculiaridades de operação dos estágios de conversão e suas perdas inerentes de processo. Os resultados obtidos apontam que a produção de açúcar e álcool possui maior relevância em relação à produção de biogás e eletricidade. Todavia, a cogeração agrega valor à eficiência do processamento da cana e incrementa a receita econômica do empreendimento através da venda de excedentes de energia à rede.

Morandin et al. (2011) investigam as potenciais rotas para a melhora da integração energética nos processos de conversão da cana-de-açúcar nos principais derivados, focando inicialmente os processos propriamente ditos, e depois considerando a cogeração a partir do bagaço. A relação entre a produção de açúcar e álcool, o chamado *mix* de produção, é considerada como parâmetro na análise da otimização proposta para minimizar as demandas térmicas dos processos e produzir o máximo de energia elétrica excedente possível para a configuração de usina apresentada. Os resultados obtidos apontam as melhorias termoeconômicas a serem realizadas na planta agroindustrial de estudo. O sistema é modelado no ambiente MATLAB/Simulink, cujos componentes são representados por blocos de alto nível.

Lazzaretto et al. (2012) discutem aspectos metodológicos na síntese intensiva de energia nos processos industriais através do estudo de caso de uma usina de cana-de-açúcar. A partir da ideia original de um processo, definido com base em uma Planta Básica de Configuração (PBC), diferentes configurações para a produção combinada de açúcar e etanol são verificadas e seus fluxos de calor e consumo energético são determinados e comparados no intuito de esclarecer os aspectos tecnológicos para a síntese de produção. Os resultados apresentados evidenciam os benefícios decorrentes da integração térmica dos processos.

Ensinas et al. (2007) analisam a redução da demanda de vapor no processamento do açúcar e etanol, e alternativas para sistemas de cogeração agroindústrias sucroalcooleiras visando o aumento da geração de excedentes em eletricidade. A integração de técnicas e processos na produção conjunta dos derivados da cana permite um incremento na geração de energia elétrica. Considerando um *mix* de produção de 50 % para o açúcar e 50 % para o etanol, com o aproveitamento do melaço na geração de álcool, os autores simulam um caso base, característico das usinas brasileiras, e propõem um estudo de caso melhorado objetivando a redução nas demandas de vapor do processo e promovendo melhor uso energético no complexo sucroenergético. Os resultados mostram que no curto prazo as plantas industriais tradicionais, baseadas nos ciclos a vapor com turbinas de contrapressão, permitem obtenção de quantidades significativas de bagaço por meio da redução das demandas térmicas, possibilitando o uso deste material como insumo

para outras indústrias. Ciclos a vapor com turbinas de extração-condensação permitem incrementos consideráveis na geração de excedentes de eletricidade para estas plantas, enquanto que a gaseificação da biomassa pode vir a ser uma importante via tecnológica apenas no futuro.

Esforço semelhante foi desenvolvido por Walter (1994) em sua tese de doutorado, cujo objetivo é a análise das perspectivas de cogeração e produção independente de energia elétrica nas usinas integradas de açúcar e álcool. Em linhas gerais, o autor identifica os processos de reorganização institucional do setor elétrico, contextualiza a geração descentralizada de energia elétrica e avalia as alternativas de geração de eletricidade em larga escala a partir dos subprodutos da cana. A geração e a comercialização de energia elétrica excedente no complexo sucroalcooleiro se mostram competitivas frente a outras formas de geração elétrica, bem como representam uma boa opção de investimento. Tecnologias como o emprego de turbinas a gás nos ciclos a vapor e gaseificação da biomassa podem ampliar o potencial de geração em pelo menos 50 % em relação aos sistemas térmicos tradicionais. Entretanto, tais soluções apresentam viés comercial, tornando-se atrativas apenas a médio e longo prazo.

Seabra (2008) investiga, no cenário prospectivo, as opções tecnológicas que permitem o melhor aproveitamento da biomassa da cana e suas possíveis implicações no contexto das usinas. Foram avaliadas quatro tecnologias de aproveitamento do bagaço e palha da cana: geração de energia elétrica a partir dos ciclos a vapor; produção de etanol através da hidrólise; geração de energia a partir da gaseificação da biomassa integrada a ciclos combinados; e a produção de combustíveis de síntese a partir da gaseificação da biomassa. Para realizar as análises envolvidas no estudo, o autor construiu um modelo de otimização de usinas, utilizando o *software* Lingo, para o cálculo dos balanços de massa e energia envolvidos numa agroindústria típica, cujos rendimentos são obtidos nas equações indicadas no Manual do Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo (Consecana-SP). Além da discussão das atuais configurações, novas abordagens da produção sucroenergética foram avaliadas para cada opção tecnológica. Evidencia-se com este trabalho o grande benefício econômico e ambiental resultante dos diversos usos dos açúcares e fibras da cana para a produção de produtos com maior valor agregado, implicando no estabelecimento de futuras bio-refinarias a partir deste insumo agrícola.

Carvalho (2009), propõe um modelo de planejamento agregado que contribui para maximizar a margem das usinas de açúcar e álcool, considerando os custos referentes às etapas agrícola, industrial e comercial a nível gerencial. Para tal objetivo, o autor minimiza os custos de produção da cadeia produtiva e integra as etapas de produção da Usina Alta Paulista, planta agroindustrial de médio porte e objeto de estudo da dissertação.

As decisões presentes no modelo ocorrem em função dos preços nos mercados interno, externo e futuro, fluxo de caixa da empresa e possibilidades de estoque, contemplando um horizonte de 52 semanas que inclui os períodos de safra e entressafra no centro-sul do Brasil. Utiliza-se um modelo de escolha do *mix* do produto para *hedge* vinculado à lucratividade e minimização do risco envolvido para a parte comercial. Nas decisões relacionadas as demais etapas é proposto um modelo de MILP. Define-se como *hedge* o instrumento que visa proteger operações financeiras contra riscos de grande variação de preço de um determinado ativo. O modelo SOVTICE, assim denominado pelo autor, agrega os processos industriais e comerciais, e tem como *inputs* os custos médios de produção do açúcar tipo exportação, etanol anidro e hidratado. A saída do modelo alimenta um segundo problema, definido como *problema do mix de produção*, cujo objetivo é a decisão do *mix* de produção em cada período de safra, estipulando uma cota de *hedge*. A abordagem, implementada no *software* Lingo, apresenta resultados satisfatórios e as modelagens mostram-se efetivas nos auxílio às decisões no setor canavieiro, proporcionando um planejamento mais eficiente e seguro da atividade.

Lamounier et al. (2006) estudam a composição do *mix* de produção de acordo com os sinais de mercado representados pelos preços dos produtos. Os autores analisam o *trade-off* das usinas com destilarias anexas, na região Centro-Sul do país, entre a produção do açúcar e álcool, e avaliam a influência dos preços à vista e futuro ao produtor para melhor definição do planejamento da produção conjunta destes produtos finais. Também, verificam a competitividade econômica dos derivados durante o processo produtivo, observando que os preços do açúcar e álcool afetam apenas a relação de produção em alguns Estados e durante eventos pontuais e não apresentam regularidade.

Paiva e Morabito (2007) apresentam um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção de usinas de açúcar e álcool, baseado nos modelos clássicos de seleção de processos e dimensionamento de lotes monoestágio e seleção de processos de produção. A modelagem, em linguagem GAMS e compilada em CPLEX, visa representar o sistema de produção sucroalcooleiro e inclui decisões para as principais etapas e escolhas do processamento da cana. O modelo proposto auxilia no planejamento agregado de produção e permite uma melhor compreensão das variáveis inerentes ao problema, corrigindo os erros de previsão e alocando cada decisão a nível apropriado, inibindo julgamentos parciais.

Dantas Filho (2009), em sua dissertação de mestrado, faz uma análise de custos na geração de energia a partir do bagaço da cana, elaborando um estudo de caso para quatro usinas do Estado de São Paulo. O autor analisa a viabilidade econômico-financeira, considerando uma abordagem determinística, e calcula os principais índices de investimento: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e período



de recuperação (*payback*). A geração elétrica é estimada de acordo com a capacidade instalada das usinas e o período de safra mais provável. Os excedentes de eletricidade resultantes da operação agroindustrial são comercializados no Ambiente de Contratação Livre (ACL), em contratos bilaterais com agentes compradores, a um preço definido. Através deste trabalho é possível concluir que o investimento nas plantas de cogeração apresenta viabilidade e o bagaço se apresenta como terceiro produto do setor sucroalcooleiro, justificando os investimentos neste segmento e proporcionando resultados positivos aos investidores. A eletricidade excedente é um produto técnica e economicamente viável para as usinas, além de atrativo. Seu custo tende a cair conforme a curva de aprendizado, com consequente aumento de produção.

### 1.3 Objetivos e contribuições

Este trabalho tem por objetivo modelar o processamento agroindustrial da cana-de-açúcar, através da teoria de pesquisa operacional, em particular a os métodos de programação linear, de maneira a encontrar uma configuração de produção da planta que maximize o lucro da empresa. O lucro aferido corresponde à diferença entre as receitas totais obtidas e os custos no processo de produção.

Espera-se como resultado subsidiar as decisões do produtor com informações a respeito da alocação de recursos para a fabricação das *commodities* e atendimento das demandas energéticas do processo de produção na indústria canavieira. A contribuição desta pesquisa vem de uma análise detalhada do planejamento de produção e alocação de recursos em função das variações determinísticas dos preços que influenciam a tomada de decisão.

## 1.4 Estrutura capitular

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro, Introdução, contém uma descrição geral da evolução da organização do setor sucroalcooleiro, uma revisão da literatura, os objetivos e contribuições desta pesquisa.

O segundo capítulo, Cultura da cana-de-açúcar, traz a caracterização da biomassa como insumo desta indústria, bem como descreve as principais etapas do processamento da matéria-prima e obtenção dos seus derivados. Ao final, comenta a cerca da comercialização das *commodities* nos mercados interno e externo.

A seguir, no terceiro capítulo, Tópicos de Pesquisa Operacional, é apresentada uma introdução à Pesquisa Operacional ilustrando as etapas de elaboração de um modelo de otimização. A Programação Linear, foco deste trabalho é detalhada. Este capítulo apresenta também os métodos Simplex e de Pontos Interiores.

O quarto capítulo, Metodologia, descreve a metodologia empregada para a solução da alocação de recursos no problema de planejamento da produção da indústria canavieira. Nele são apresentados o objeto de estudo, o modelo matemático, os dados de entrada e saída e as premissas adotadas.

No quinto capítulo, Estudos de casos e análise de resultados, três estudos de caso são desenvolvidos e seus resultados são analisados. O primeiro utiliza dados extraídos da literatura e preços atuais de mercado. No segundo estudo de caso o modelo é alimentado com dados da indústria Ferrari. No terceiro, faz-se uma análise de sensibilidade variando alternativamente os preços das *commodities*.

Finalmente, no sexto capítulo, Conclusões e trabalhos futuros, são evidenciadas as conclusões finais do estudo. Ainda neste capítulo são feitas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Cultura da cana-de-açúcar

Este capítulo inicia apresentando uma breve descrição sobre a indústria canavieira, caracterizando a produção das *commodities*, produtos e subprodutos obtidos a partir de um insumo em comum: a cana-de-açúcar. Qualifica a biomassa como vetor energético, discutindo seu papel dentro do contexto da agroindústria e do setor elétrico brasileiro. Ao final, discorre sobre a comercialização dos principais derivados, abordando as relações entre oferta e demanda nos mercados mais relevantes.

### 2.1 Caracterização da biomassa como energético

A ANEEL (2015) define biomassa como todo recurso renovável constituído principalmente de substâncias de origem orgânica. O termo destaca-se com o uso da matéria vegetal criada pela fotossíntese a partir de seus derivados. Lora (2001) divide a biomassa em duas categorias de fontes energéticas: biomassa tradicional, formada por resíduos vegetais em geral; e biomassa moderna, que trata da utilização das chamadas culturas energéticas.

Dantas (2010) argumenta que, como fonte de energia primária, a biomassa é tida como uma das principais responsáveis pela energia consumida nos países em desenvolvimento. Apesar das dificuldades de estocagem, armazenamento e menor poder calorífico quando comparada com outros energéticos, é uma fonte renovável cujas emissões de gases atmosféricos, além de seus custos, podem ser atenuados. A motivação primordial para o uso e difusão desse vetor na composição da matriz energética mundial é a necessidade de redução no uso dos derivados de petróleo.

A principal fonte para gerar energia da biomassa está nos resíduos. Os detritos gerados em todo o mundo são recursos de grande potencial para a obtenção de energia apenas sob uma adequada exploração. Uma vez que cada tipo, animal, vegetal, industrial e florestal, apresenta tecnologia diferenciada para seu processamento e transformação, é preciso avaliar o custo e a eficiência energética ao longo de sua cadeia produtiva. Houve muitas tentativas para estimar a produção e uso dos resíduos globais, mas todas apresentaram variações, pela existência dos diferentes usos alternativos e também pela necessidade de se determinar o que é ou não resíduo utilizável para a obtenção de energia (CORTEZ et al., 2008).

As principais regiões produtoras de energia a partir da biomassa concentram-se na zona intertropical, com destaque para os países da América Latina, Caribe e Ásia. No Brasil, a cana-de-açúcar é a principal fonte de biomassa para fins energéticos e sua indústria possui avançado nível de maturidade tecnológica. A experiência brasileira é importante em função do porte da atividade canavieira, mas não da eficiência com que a biomassa é aproveitada.

### 2.1.1 A matéria-prima cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar empregada como matéria-prima para produção de açúcar, etanol e eletricidade é constituída do colmo (81,2%) no qual se encontram os açúcares, palmito (6,1%), folhas verdes (5,6%) e secas (7,1%). De um total de energia contida em sua estrutura, aproximadamente 1/3 está no caldo e o restante dividido em partes iguais entre o bagaço e a palha, fazendo destes subprodutos uma fonte rica em açúcares. Pesquisas têm sido intensificadas nos últimos anos para o aproveitamento total destas fontes de recursos renováveis, incluindo a obtenção de etanol celulósico. O desenvolvimento desta rota tecnológica permitirá, entre outros benefícios, a utilização integral da cana possibilitando aumentar significativamente a produção das principais *commodities* resultantes desta cultura sem que para isto seja necessário expandir a área de cultivo (TOLMASQUIM, 2004).

Com relação à composição química, observa-se nas Tabelas 2.1 e 2.2 que ela é bastante mutável quanto a proporção dos elementos constituintes da cana. Porém, em termos qualitativos, os cultivares são semelhantes em todas as variedades. Pode-se dizer que as fibras são consideradas como todo o material insolúvel em água, e o caldo o conjunto de todos os sólidos solúveis contidos (BASSETO, 2006).

Tabela 2.1: Composição média da cana-de-açúcar das principais variedades brasileiras.

Componente	Teor (%)
Água	65 – 75
Açúcares	11 – 18
Fibras	8 – 14
Sólidos Solúveis	12 – 23
Fonte: (LAMONICA, 2007)	

Tabela 2.2: Constituintes da cana-de-açúcar.

Constituintes	Sólidos Solúveis (%)
Açúcares	75 – 93
Sais	3 – 5
Proteínas	0,5 – 0,6
Amido	0,01 – 0,05
Canas	0,3 – 0,6
Ceras e graxas	0,05 – 0,15
Corantes	3 – 5
Fonte: (LAMONICA, 2007)	

A sacarose é a matéria-prima tanto do açúcar quanto do álcool e seu teor é o principal critério para a determinação da qualidade varietal da cultura. Por outro lado,

a fibra é considerada como uma das grandes razões para a enorme competitividade dos produtos da cana, uma vez que o seu uso como energético garantiu às usinas a auto-suficiência em energia e, até mesmo, a possibilidade de venda de excedentes (SEABRA, 2008).

### **2.1.2 A palha e o bagaço como matéria-prima**

O principal resíduo da cana-de-açúcar é o palhiço, composto do material deixado no campo após a colheita mecanizada. É formado pela terra, ervas daninhas e palha, que por sua vez é constituída por ponteiros e folhas. Segundo Rosillo-Calle et al. (2005), a palha representa aproximadamente 25% a 30% da energia total na planta, rendendo anualmente até 10 t/ha de matéria seca. Apesar desta constatação, existe uma discussão profunda no setor canavieiro sobre o aproveitamento deste energético, uma vez que as técnicas de plantio conservacionista preveem a cobertura do solo para a melhoria contínua do ambiente e aumento da produtividade agrícola. A prática do Sistema de Plantio Direto (SPD) está diretamente ligada à formação de palha na cobertura do solo.

A palha protege a superfície do solo e, conseqüentemente, seus agregados da ação direta dos raios solares e do vento; diminui a taxa de evaporação, permitindo o aumento da infiltração e do armazenamento de água no solo e mantém a temperatura amena na camada mais superficial, reduzindo sua amplitude, e favorecendo o desenvolvimento de plantas e organismos do solo. Quando incorporada no solo, sua decomposição é lenta e gradativa, promovendo aumento da matéria orgânica. Com o aumento da matéria orgânica, que é fonte de energia para os microrganismos, ocorre também aumento da atividade microbiana que, aliada à mineralização, disponibiliza nutrientes às plantas, induzindo acréscimos na produtividade dos cultivos (HECKLER, 2002).

Se transportada para a usina, a palha representa um enorme potencial energético. Todavia, esse potencial depende do teor de mecanização da colheita, topografia do terreno e dos requerimentos para proteção do solo, conforme já mencionado. Walter (1994) emprega em seu trabalho uma estimativa de aproveitamento de 50% das pontas e folhas. Seabra (2008) encontra menores custos para um percentual de 71% de aproveitamento da palha. Cabe destacar que, a quantidade de palha a ser deixada no campo não tem um valor fixo, e varia conforme as exigências locais. Todavia, o uso econômico da palha também dependerá de rotas tecnológicas economicamente viáveis, transformando-a em produto final mais valioso.

Assim como a palha, o bagaço, obtido no processamento da matéria-prima, pode ser aproveitado no complexo canavieiro para a geração de energia. O teor energético do bagaço é aproximadamente 1/3 da energia total da cana e quando utilizado como insumo pode fornecer calor, por meio de sua combustão em caldeiras a vapor, suficiente

para produzir toda a demanda térmica necessária ao processo de produção de açúcar e de álcool e também gerar eletricidade suficiente pelos turbogeradores para colocar em funcionamento todos acionamentos elétricos e atender outras necessidades.

Mesmo suprimindo a demanda interna das usinas, ainda existe bagaço em demasia no Brasil. Muitas usinas simplesmente ajustam suas caldeiras para queimar o bagaço excedente, porque, do contrário, o resíduo se deteriorará sem benefício algum.

Apesar do bagaço e da palha serem fibras com a mesma origem, suas características físicas e químicas podem ser bem diferentes. O bagaço tem uma granulometria menor por ser processado da extração do caldo de cana e é mais fino comparado com a palha não processada. A palha por sua vez, apresenta um poder calorífico 1,7 vezes superior, porém, exige maiores esforços no seu manuseio e transporte, como o adensamento, enfardamento, enleamento e picagem.

## 2.2 Processamento industrial da cana-de-açúcar no Brasil

A produção de cana-de-açúcar no Brasil, expressa em toneladas, foi de 224 milhões em 1989, 241 milhões em 1994, 317 milhões em 2003 e 618 milhões em 2015. A porcentagem de matéria-prima usada para a produção de álcool foi de aproximadamente 65 % em 1989, 50 % em 1998 e cerca de 58 % em 2015, destacando as oscilações na demanda deste derivado por conta do comportamento do mercado brasileiro de combustíveis, desde o Proálcool até o advento dos veículos leves com a tecnologia *flex-fuel*, os chamados *Flexible Fuel Vehicles* (FFV).

Os principais produtos da agroindústria canavieira no Brasil são: o açúcar, que atende o mercado alimentício; o álcool etílico anidro carburante (AEAC), usado como combustível adicionado à gasolina; e o álcool etílico hidratado carburante (AEHC), que atende apenas a parcela de veículos movidos exclusivamente a álcool ou multicomcombustíveis, além de um pequeno mercado de uso não energético (CARVALHO, 2009). Recentemente, o bagaço e a palha adquiriram notoriedade dado o potencial de cogeração de energia nos ciclos a vapor. Apesar da lentidão no desenvolvimento do mercado de cogeração no país, este tipo de indústria cresceu significativamente nos últimos anos, tendo hoje flexibilidade e capacidade de produzir quantidades variadas dos principais derivados da cana. Ganhos sinérgicos foram obtidos em relação a produção conjunta de açúcar e álcool.

Afim de facilitar o entendimento do processamento industrial da cana-de-açúcar nas usinas e destilarias, o beneficiamento da cana foi dividido em setores, e cada um deles descrito separadamente, cobrindo desde a recepção da matéria-prima até a produção de energia para suprir a operação na planta industrial.

### 2.2.1 Recepção da matéria-prima na porta das usinas

O transporte da cana no país é predominantemente rodoviário, feito por caminhões com reboque do tipo “romeu e julieta”, treminhões e rodotrens, conforme podem ser vistos e diferenciados na Figura 2.1. A cana cortada manualmente é carregada inteira, enquanto a cana colhida mecanicamente é picada e carregada em pedaços de 20 a 25 cm de comprimento. Particularmente no Estado de São Paulo, aproximadamente 90 % da colheita é mecanizada por conta de restrições ambientais, a exemplo da Lei Estadual 11.241 de 2002 que propõe a eliminação gradativa da queima da palha no campo.





Composição	Descrição	Ilustração
Truck/Toco/Caminhão Simples	Caminhão plataforma	
Romeu e Julieta/Biminhão	Caminhão plataforma com uma carreta acoplada	
Treminhão	Caminhão plataforma com duas carretas acopladas	
Rodotrem	Cavalo mecânico com dois semi-reboques acoplados	

Figura 2.1: Combinações de caminhão e reboque mais comuns utilizadas no transporte da cana

De acordo com Moraes e Shikida (2002), as carretas contendo o montante de matéria-prima colhida no campo são submetidas à balanças eletrônicas cuja carga é pesada antes de adentrar nas usinas. Alguns carregamentos são selecionados e reservados como amostras para que se determine posteriormente, em laboratório, o teor de sacarose da matéria-prima. Essa avaliação permite o controle agrícola, a remuneração do transporte, o controle da moagem, o cálculo do rendimento industrial e a determinação dos valores para o pagamento da cana. Cortez (2010) cita que tal procedimento é realizado por sorteio, sendo que todos os caminhões de fornecedores são amostrados.

A cana-de-açúcar pode ser descarregada para armazenamento temporário, dada a sua perecibilidade, ou conduzida diretamente nas moendas para ser processada. O material estocado no pátio, por sua vez, é submetido às mesas de alimentação, concebidas com inclinações variando de 5 até 45° de forma a produzir colchões de cana homogêneos e contínuos e facilitar as operações subsequentes. Com o crescimento da colheita meca-

nizada, a mesa alimentadora sofreu uma série de adaptações para permitir a recepção de cana picada. As modificações para aumentar a eficiência na eliminação das impurezas minerais são muito importantes, uma vez que a cana picada não pode ser lavada como a cana inteira, sob pena de sofrer perdas inaceitáveis de açúcares.

### **2.2.2 Preparo da cana**

Segundo Walter (1994), o preparo da cana visa a desintegração parcial do colmo de maneira a aumentar o grau de exposição das células e facilitar o processo de extração da sacarose. Rosillo-Calle et al. (2005) frisa que a matéria-prima é preparada para que sua densidade aumente e, consequentemente, sua capacidade de ser moída. Ao forçar a abertura de suas células, além de liberar o caldo, é possível obter maior rendimento no processo de extração.

O setor de preparo é formado, juntamente com os setores de recepção e extração do caldo, por equipamentos dispostos sequencialmente, de forma integrada, e otimizados em conjunto. A padronização destes procedimentos veio em 1974, quando a Cooperativa de Produtores de Cana, Açúcar e Energia do Estado de São Paulo Ltda (Coopersucar) contratou a consultoria Deon Hullet para desenvolver tecnologias mais eficientes e adaptadas para a realidade brasileira. A moenda foi escolhida como o sistema para a extração do caldo a ser utilizado por conta do seu domínio já existente na aplicação canavieira. O sistema de preparo foi, então, padronizado com um picador e um desfibrador montados sobre a esteira metálica, entre a mesa alimentadora e a moenda. Para moagens mais elevadas, é recomendada a instalação de mais um picador na frente do conjunto para atuar como nivelador do colchão de cana.

Tanto o sistema de preparo quanto de extração, são consumidores de vapor para acionamento das turbinas, que fornecem energia mecânica aos picadores, desfibradores e ternos da moenda. A eletrificação destes equipamentos, possibilitada pela substituição dos turbogeradores por motores elétricos, permite um incremento significativo na eficiência de conversão energética, resultando em aumento na geração elétrica excedente.

### **2.2.3 Moagem da cana**

A cana-de-açúcar é formada basicamente de caldo e fibra. Uma vez que a sacarose está dissolvida no caldo, o objetivo do processo de moagem é a extração da maior quantidade possível de açúcar da cana. Em escala industrial, são empregados dois processos básicos de extração: a moagem e a difusão (ROSILLO-CALLE et al., 2005).

Na moenda, a cana é exposta entre rolos submetidos a determinadas pressões e rotações, expulsando o caldo do interior das células. A matéria-prima sofre várias compressões, resultando desta operação caldo misto e bagaço. O caldo extraído segue



para os processos de tratamento, enquanto o bagaço é direcionado às caldeiras, onde é queimado para gerar vapor.

Para aumentar a extração da sacarose, é utilizado um sistema de embebição composta, cujo processo consiste na adição de água ao bagaço a fim de aumentar a diluição do caldo remanescente. A moagem é estritamente um processo volumétrico. Até esta etapa, o processamento agroindustrial da cana é comum para as produções de açúcar e etanol. A solução de caldo misto, antes de separada, recebe tratamento primário, através de sua passagem por peneiras, para a eliminação das impurezas insolúveis visando adequação da matéria-prima às etapas posteriores.

#### **2.2.4 Produção de açúcar**

O caldo que sai da moenda, após submetido ao tratamento inicial, tem a sua massa quantificada e passa por tratamento químico de sulfitação e calagem. Na adição de sulfito, busca-se baixar o pH do caldo, inibir as reações que causam formação de cor, coagular os coloides solúveis, precipitar o sulfito de cálcio e diminuir a viscosidade do caldo, facilitando as operações de evaporação e cristalização. Já a neutralização do caldo pela adição de cal tem como objetivos a eliminação de corantes, a neutralização de ácidos orgânicos e a formação de sulfito e fosfato de cálcio, produtos que, ao sedimentar, arrastam consigo impurezas presentes no líquido. Esses agentes químicos sob efeito da temperatura provocam a formação de precipitados que promovem a remoção das impurezas sem afetar o teor de sacarose. Observa-se que a definição do processo de purificação depende basicamente do tipo de açúcar a ser fabricado.

Após o tratamento químico, o caldo é aquecido até aproximadamente 105 °C para acelerar a coagulação e floculação dos coloides de proteína não açucarados e para emulsificar as gorduras, resinas e ceras, além de promover a remoção dos gases. Após seguir para o decantador, onde ocorre a sedimentação das impurezas, é enviado a filtros de vácuo e desta etapa resultam o caldo filtrado e a torta residual, composto orgânico rico em cálcio, nitrogênio e fósforo, sendo destinado como complemento à adubação. O caldo clarificado, então, segue para evaporadores contínuos, onde ocorre sua concentração, e ao atingir 60 ° Brix é denominado xarope (ROSILLO-CALLE et al., 2005).

Depois que deixa os evaporadores, o xarope é enviado para outra fase do processo de concentração, em que ocorre a formação de cristais como resultado da precipitação da sacarose dissolvida na água. A massa cozida formada pelo xarope concentrado a 90 ° Brix segue para os cristalizadores, para recuperar parte da sacarose ainda contida no mel, e, então, é descarregada nas centrifugas. Dentro das centrifugadoras, o melaço é segregado dos cristais de sacarose e o processo é concluído com a lavagem destes em água ou vapor. O melaço removido é coletado em um tanque para a recuperação do açúcar dissolvido, e

o material remanescente deste processo, chamado melaço final, é destinado à produção de etanol. O açúcar descarregado das centrifugas é encaminhado à secagem para, finalmente, ser empacotado, pesado e armazenado. O diagrama com o fluxo genérico do processo de fabricação desta *commodity* é apresentado na Figura 2.2.

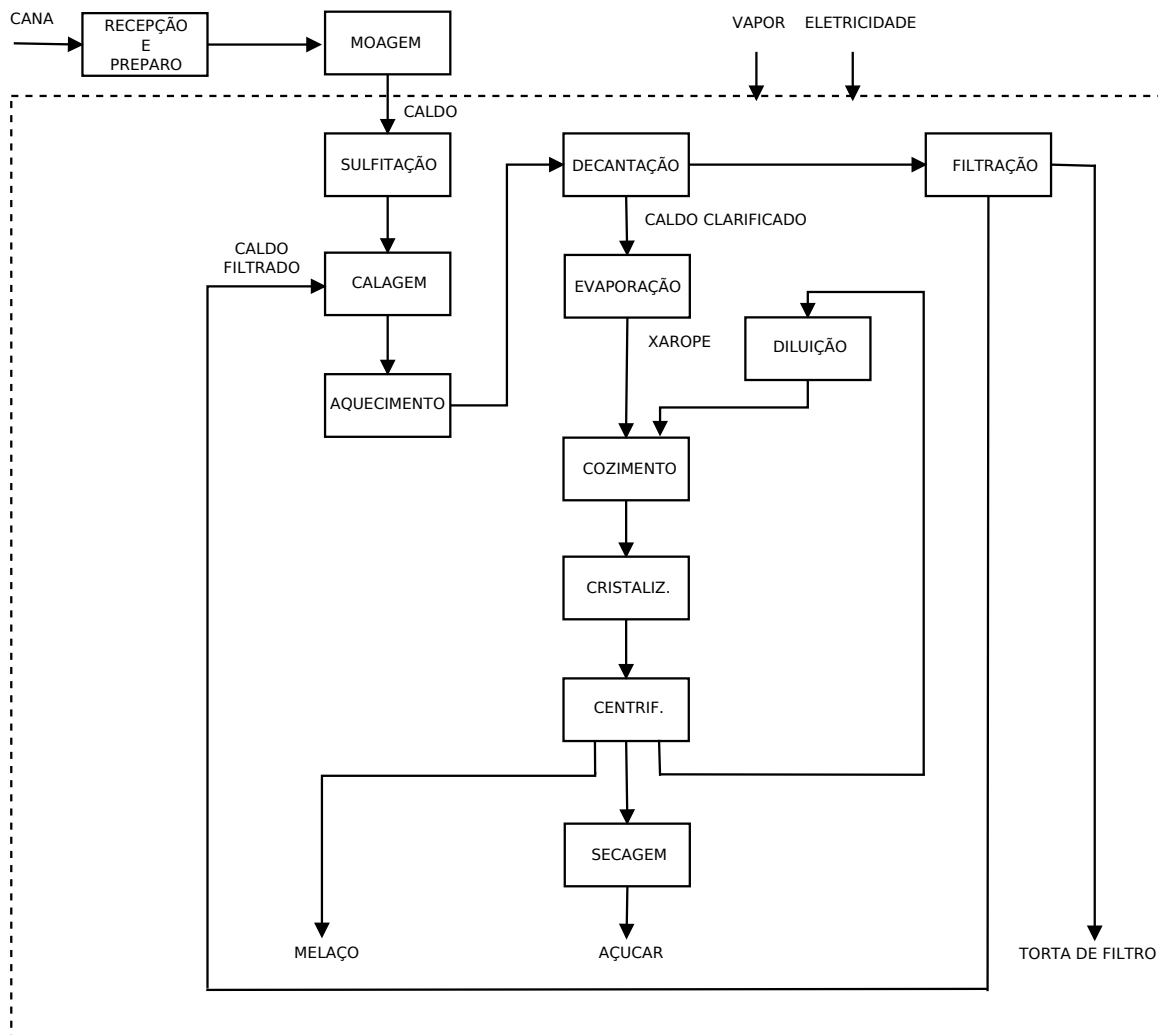


Figura 2.2: Fluxo genérico do processo de fabricação de açúcar  
fonte: (SEABRA, 2008), adaptado

O açúcar pode, ou não, ser refinado de acordo com o grau de pureza que se deseja obter da matéria-prima. Açúcares mais escuros, como o VHP e o VVHP, chamados de açúcares de alta e altíssima polarização, são mais puros e possuem baixa umidade, o que os tornam ideais para exportação. O VVHP, por sua vez, tem sua coloração ainda mais baixa, granulometria fina e apresenta polarização elevada, característica que facilita a sua filtrabilidade. Já o açúcar refinado, conhecido como Icumsa 45, tem fácil dissolução, granulometria muito fina, além da coloração branca que o torna amplamente utilizado. No refinamento, adicionam-se aditivos químicos de maneira que, além das característi-

cas citadas, o açúcar torna-se saboroso. Entretanto, tal tratamento químico tem por consequência a remoção de vitaminas e sais minerais do produto.

### 2.2.5 Produção de álcool

Com a grande expansão da produção de etanol nas duas primeiras fases do Proálcool, entre 1975 e 1985, esse produto ganhou uma enorme importância econômica e estratégica para o setor sucroalcooleiro. No início do Proálcool, o etanol representava aproximadamente 10 % da cana processada no Brasil, e esse percentual chegou a cerca de 70 % no final desses dois períodos de crescimento (CORTEZ, 2010).

A produção brasileira de etanol é baseada na fermentação tanto do caldo da cana, como de misturas de caldo e melaço, o que permite uma grande sinergia na produção de açúcar e álcool nas usinas brasileiras. A fermentação alcoólica é um processo de transformação bioquímica de açúcares em etanol, gás carbônico e calor, sob ação enzimática de leveduras. As primeiras etapas do processo de fabricação, da recepção da cana ao tratamento inicial do caldo, são semelhantes àquelas empregadas na fabricação do açúcar. Em um tratamento mais completo, o caldo passa por purificação, pasteurização, adição de cal, aquecimento e decantação. Livre de impurezas e esterilizado, o caldo é misturado com o melaço, formando o mosto, e está pronto para ser enviado para a destilaria.

O mosto segue pelas dornas de fermentação, onde é adicionado de leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*) e fermentado por um período de 6 a 12 horas. O processo de fermentação mais utilizado nas destilarias do Brasil é o *Melle-Boinot*, cuja característica principal é a recuperação das leveduras através da centrifugação do vinho (mosto fermentado). Após a fermentação, o vinho (com uma concentração de 7 a 10 % de álcool) é centrifugado, para a recuperação das leveduras, e enviado para as colunas de destilação (SEABRA, 2008).

O álcool presente no vinho é recuperado por meio de destilação, utilizando diferentes pontos de ebulição das várias substâncias voláteis contidas no vinho, separando-as por meio de aquecimento. A operação é realizada com a ajuda de sete colunas distribuídas em quatro estágios: destilação, retificação, desidratação e recuperação do ciclo-hexano. Na primeira etapa, o etanol separado do vinho sai com a flegma (vapores de 40 a 50 °GL), que é enviada à retificação. Os voláteis dão origem ao álcool de segunda qualidade e à vinhaça, composta pelas demais substâncias presentes. A vinhaça, ou vinhoto, possui índice de produção de aproximadamente 13 vezes o do álcool, resultando em uma proporção de 13 litros deste subproduto para cada litro de etanol produzido. Apresenta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) significativa e é direcionada à lavoura para aplicação como fertilizante da cana.

Na etapa de retificação, a flegma é concentrada com uma graduação de apro-

ximadamente 96 °GL e purificada, dando origem ao álcool hidratado. O álcool produzido pode ser diretamente armazenado, ou enviado para a desidratação, para a produção do etanol anidro. Dado o caráter azeotrópico da mistura de álcoois, o etanol hidratado não pode ser separado por destilação simples. Para tanto, existem três tecnologias mais difundidas no Brasil: desidratação através da adição do ciclohexano, destilação extrativa com monoetilenoglicol e adsorção com peneiras moleculares.

Os setores de fermentação e destilação são os maiores consumidores de energia térmica na produção do etanol, mas, como o bagaço disponível é suficiente para fornecer a energia total requerida pela destilaria ou usina, essa situação persiste até hoje. Os consumos de vapor nessas tecnologias de destilação e desidratação permanecem nas faixas de 3,0 a 3,5 e 1,5 a 2,0 kg de vapor por litro de etanol, respectivamente (CORTEZ, 2010).

O diagrama de fluxo genérico de processo de produção de etanol é mostrado na Figura 2.3. Um fluxograma geral contemplando a produção de açúcar e álcool numa mesma planta industrial é mostrado na sequência, bem como a ilustração com o modelo simplificado brasileiro de produção integrada, elucidando cada etapa do processo (Figura 2.4).

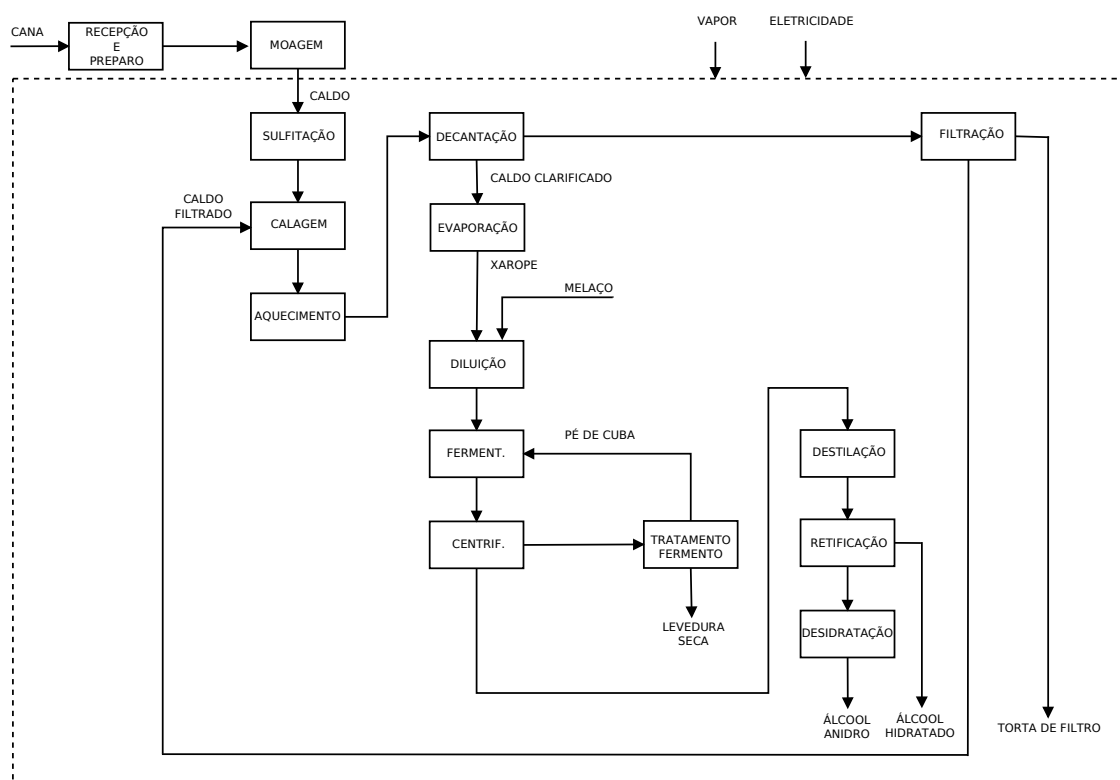


Figura 2.3: Fluxo genérico do processo de fabricação do álcool  
fonte: (SEABRA, 2008), adaptado

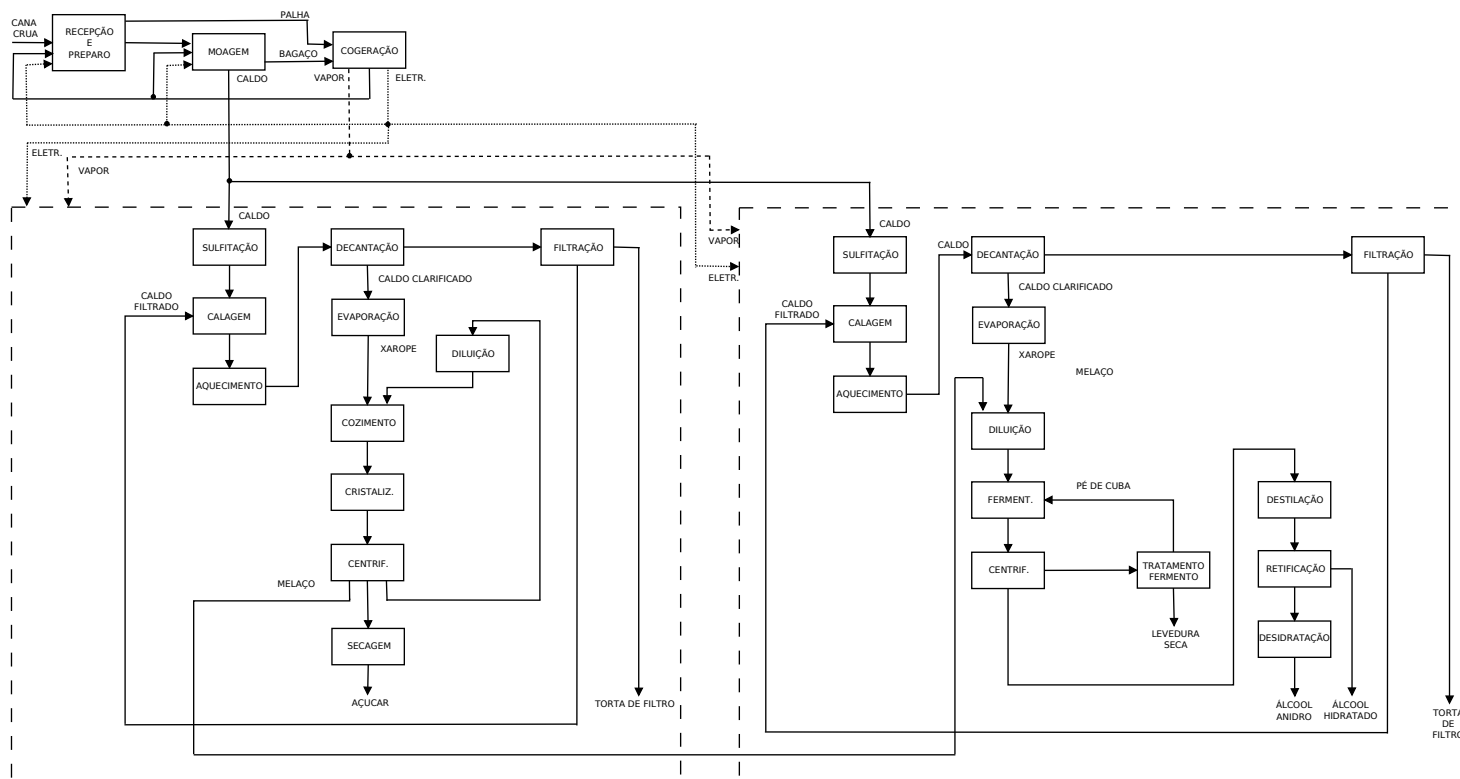


Figura 2.4: Fluxograma geral do processo de fabricação do açúcar e álcool

### 2.2.6 Produção de eletricidade

Para Cortez (2010), a evolução do setor energético das usinas e destilarias brasileiras foi tão significativo quanto a de outras áreas, porém ocorreu em um ritmo bem mais lento, devido a fatores institucionais e o fato de o bagaço ser um combustível abundante e sem custo para as usinas, que não encontravam outro uso para ele. O autor elucida que o sistema energético das usinas é constituído de caldeiras que queimam bagaço, turbinas de contrapressão para acionamento dos turbogeradores de energia elétrica e dos equipamentos mais pesados. O vapor na saída das turbinas é encaminhado ao processo para suprir a demanda de energia térmica.

O processamento da cana é altamente intensivo no uso de energia, principalmente energia térmica para a concentração do caldo, destilação e desidratação do etanol. No início do Proálcool, grande parte das usinas consumia quantidades consideráveis de lenha para complementar o bagaço como combustível; além disso, boa parte da energia elétrica necessária à operação da planta era adquirida das concessionárias por preços ainda muito baixos. Hoje, as usinas mais modernas geram excedentes de energia elétrica para a venda e ainda operam com sobra de bagaço. Cortez (2010) divide a evolução do processo em três etapas:

- *Fase pré-Proálcool:* antes de 1975, o consumo de vapor no processo chegava a valores da ordem de 600 kg/tonelada de cana processada (tc), demandando o uso de lenha para complementar o bagaço. Devido às configurações de baixa eficiência, como pressões entre 11 e 22 bar, caldeiras de pequena capacidade, tiragem manual, turbinas de acionamento de simples estágio e operação com excesso de ar, as usinas, de um modo geral, compravam lenha para complementar o bagaço nas caldeiras. Além disso, praticamente todas adquiriam energia elétrica da concessionária para operar o processo.
- *Fase de autossuficiência:* com o aumento do preço da lenha e da energia elétrica, as usinas buscaram melhorar sua eficiência energética, inicialmente visando autonomia de combustível para operar só com bagaço. Como o sistema energético atuava no modo de cogeração, à medida que se reduzia o consumo de vapor de processo, era preciso incrementar a eficiência dos acionamentos mecânicos para equilibrarem as demandas de vapor vivo e vapor de processo. A eficiência das caldeiras foi paulatinamente aumentando pela adição de recuperadores de calor, melhoria da combustão e automação. O uso de turbinas multistágio nos principais equipamentos ajudou a reduzir o consumo de vapor vivo destes, sendo a sobra direcionada para os turbogeradores de eletricidade.

- *Fase de geração de energia excedente:* com a privatização parcial do setor elétrico brasileiro, iniciada nos meados da década de 1990, foi criado um ambiente institucional e regulatório que liberalizou o mercado de energia elétrica, permitindo que as usinas vendessem sua energia excedente para outros consumidores que não a concessionária a qual estava ligada. Para diversificar a matriz energética do país, o governo criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), facilitando a inserção da geração por fontes renováveis. Apesar de todos os incentivos oferecidos ao setor, as usinas não reagiram da forma esperada: as unidades mais antigas são dependentes do estado de suas caldeiras, já que são equipamentos caros e com vida útil em torno de 30 anos, e as unidades novas contam com linhas de financiamentos específicas do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES). O padrão hoje são usinas operando com vapor a 65 bar/480 °C para turbogeradores de contrapressão e vapor a 100 bar/520 °C para os turbogeradores de extração/condensação.

Segundo Tolmasquim (2004), o potencial técnico da geração de energia elétrica excedente para exportação de uma usina sucroalcooleira no Brasil, a partir da biomassa produzida pelo seu processo produtivo, tem como principal determinante a alternativa tecnológica adotada para o ciclo termoeletrico de cogeração. As alterações técnicas para a redução dos consumos específicos de energia mecânica, térmica e elétrica no processo produtivo de açúcar e etanol, o crescimento da cultura da cana-de-açúcar e o método de colheita adotado também são fatores relevantes.

Quanto ao ciclo termoeletrico praticado, diversas alternativas tecnológicas para a cogeração e geração de energia elétrica a partir da biomassa podem ser consideradas no setor sucroalcooleiro. Os turbogeradores são classificados quanto ao nível de pressão do vapor em sua saída em relação à atmosfera. No ciclo tradicional de contrapressão, a turbina expande toda a vazão de vapor recebida desde uma dada condição inicial, de alta pressão, até níveis superiores à referência, sendo esta opção tecnologia a mais usual no setor. Já nas turbinas de condensação, o vapor na saída encontra-se em uma condição de pressão abaixo da atmosférica, potencializando a geração de eletricidade devido a uma grande diferença entálpica. Além destes, existem os sistemas integrados de gaseificação da biomassa e turbinas a gás que apresentam eficiências de ordem superior aos ciclos com queima direta da biomassa em caldeiras para a geração de vapor.

A estrutura de geração e consumo de energia nas usinas de açúcar e etanol tem como principal característica o desempenho energético reduzido em função da necessidade de eliminar integralmente o bagaço e a palha resultantes do processamento da cana-de-açúcar. As eficiências térmicas, mecânicas e elétricas são significativamente baixas e representam um importante potencial a ser explorado com medidas de conservação

energética que permitiriam elevar os excedentes de eletricidade gerados.

### **2.2.7 Levedura Seca**

As leveduras são microrganismos que fazem a fermentação alcoólica, ou seja, transformam o açúcar da cana em etanol e crescem e se reproduzem rapidamente. O excedente de levedura da produção alcoólica, quando não descartado, é enviado para a Fábrica de Levedura e o produto resultante é indicado para uso em rações. Esta utilidade é justificada por diversos fatores, dentre os quais a disponibilidade deste resíduo durante toda a safra e sua composição química com proteínas de alto valor.

Estima-se que para cada litro de álcool produzido, 30 gramas de levedura são geradas na forma de resíduo, após a fermentação do caldo. Considerando uma média de produção anual de 15 bilhões de litros de etanol, estima-se que 450 mil toneladas deste produto são produzidas. Observa-se que apesar do alto volume gerado, o mercado para este material está em franca expansão, e cada vez mais usinas têm considerado processá-lo para venda.

Além de seu uso ativo, utilizada na indústria da panificação, seu uso inativo constitui um grande potencial a ser explorado, principalmente para indústria alimentícia. Pesquisas apontam o uso de 4 subprodutos a partir da levedura: autolisado integral, flavorizante, ingrediente funcional e nutritivo; extrato de levedura, suplemento nutritivo e igualmente flavonizante; parede celular, fonte de fibra dietética; e concentrador protéico, conforme o próprio nome sugere.

A levedura pode ser seca através do contato direto com superfície aquecida, a chamada "sangria do leite", ou extraída do fundo da dorna. No geral, as tecnologias diferem no produto final em relação à quantidade de proteína bruta aproveitada.

## **2.3 Análise da comercialização dos produtos do setor sucroalcooleiro brasileiro**

A comercialização de produtos no setor sucroalcooleiro brasileiro tem passado por importantes transformações, em função das reestruturações que vêm ocorrendo tanto no âmbito interno como no mercado externo. No contexto nacional, as mudanças passaram a evoluir com a desregulamentação do setor promovida pelo governo brasileiro ao longo da década de 1990, mediante sua exposição à comercialização dos principais produtos em mercados operando sob condições competitivas (MORAES; SHIKIDA, 2002).

A desregulamentação econômica parece ter sido um fator determinante na forma de evolução das indústrias de açúcar e álcool combustível em período recente. As mudanças nas diretrizes políticas tiveram um efeito particularmente expressivo nos merca-



dos do setor sucroalcooleiro, considerando-se que os preços e volumes produzidos vinham sendo determinados, a cada ano-safra, pelas instituições governamentais, por um período de praticamente três décadas. A avaliação das adequações no setor canavieiro pode ser feita pela observação de mudanças no *mix* de produção de açúcar, álcool anidro e hidratado, decorrentes de alterações nos preços relativos desses produtos à medida que passaram a ser determinados sob condições de mercado competitivo (MORAES; SHIKIDA, 2002).

A ausência completa do governo e a falta de um sistema de gestão apropriado conduziram à indústria a decisão de produzir os principais derivados da cana, muitas vezes produtos ligados a mercados distintos, dificultando a adequação da demanda à oferta em um ambiente de livre mercado. Além deste fator, o principal insumo desta indústria, a cana-de-açúcar, é de origem agrícola e como tal está sujeita a riscos climáticos e fitossanitários, à sazonalidade da produção e variação da renda dos produtores.

Dessa forma, a oferta de cana-de-açúcar, de modo a atender às necessidades de matéria-prima, pode sofrer variações não planejadas, com impactos importantes não somente nos preços de todos os produtos, mas também no abastecimento dos produtos finais, principalmente o do álcool combustível. O açúcar, por ser uma *commodity* internacional, é disponível no mercado mundial em quantidades suficientes para regular o mercado em caso de falta do produto. Define-se como *commodity* todo produto que atenda características de uniformidade de produção, tenha origem primária, seja produzido por diversos produtores e negociado em grandes contingentes nas bolsas de valores.

É interessante notar que o Brasil é o único país produtor de açúcar que também produz álcool em escala industrial, embora outros países já estejam iniciando pesquisas para desenvolver o parque fabril alcooleiro, como, por exemplo, Colômbia, México, Tailândia, Índia e Austrália. O desenvolvimento do uso do álcool combustível em outros países não somente abriria o mercado para o produto nacional, como também criaria um mercado internacional de álcool, o que seria importante para garantir o suprimento nos diversos países (MORAES; SHIKIDA, 2002).

Iniciando-se a análise com o mercado da cana-de-açúcar, nota-se que a oferta de cana depende das expectativas formadas sobre seu preço e o das outras culturas, além das condições climáticas ao longo da safra. Em relação à demanda pela cana, ela é derivada das demandas existentes pelo açúcar e pelo álcool.

### 2.3.1 Mercado do açúcar

Aproximadamente 90 % da produção açucareira é destinada ao uso alimentar, que abrange desde o açúcar vendido a granel para uso doméstico, como a parte empregada nas indústrias de alimentos. Entre os usos não alimentares desta *commodity*, destaca-se o emprego como matéria prima na fabricação de compostos químicos, como o glicerol, plastificantes,

surfatantes dentre outros.

O equilíbrio do mercado de açúcar depende da adequação da oferta à demanda pelo produto. Pode-se dizer que a oferta de açúcar depende dos preços relativos de açúcar (mercado interno e externo) e álcool. Por sua vez, a demanda pelo açúcar depende da renda da população, da existência e procura pelos produtos substitutos (como adoçantes naturais e sintéticos) e das políticas protecionistas dos países importadores. Alterações em qualquer uma dessas variáveis deslocam a oferta e/ou a demanda de açúcar, com consequente modificação no equilíbrio dos outros mercados (de álcool e cana-de-açúcar).

Nos países desenvolvidos, cujo mercado de açúcar apresenta uma tendência de crescimento do consumo, ocasionando consequente aumento de demanda desta *commodity*, a produção brasileira se mostra atrativa. O Brasil responde por aproximadamente 44 % das exportações mundiais, estando já consolidado como grande *player* no cenário internacional. A tendência é de que o país mantenha esta posição, haja vista a necessidade de produção de alimentos para a crescente população mundial.

O açúcar de altíssima polarização, açúcar VVHP, possui teor de cinzas e umidade menores em relação ao açúcar VHP. Entretanto, a diferença entre estes e outros parâmetros são mínimas para ambos os açúcares, de forma que não foi encontrada série de preços na literatura distinguindo os dois tipos.

A Figura 2.5 apresenta a evolução decenal dos preços do açúcar VHP destinado à exportação.

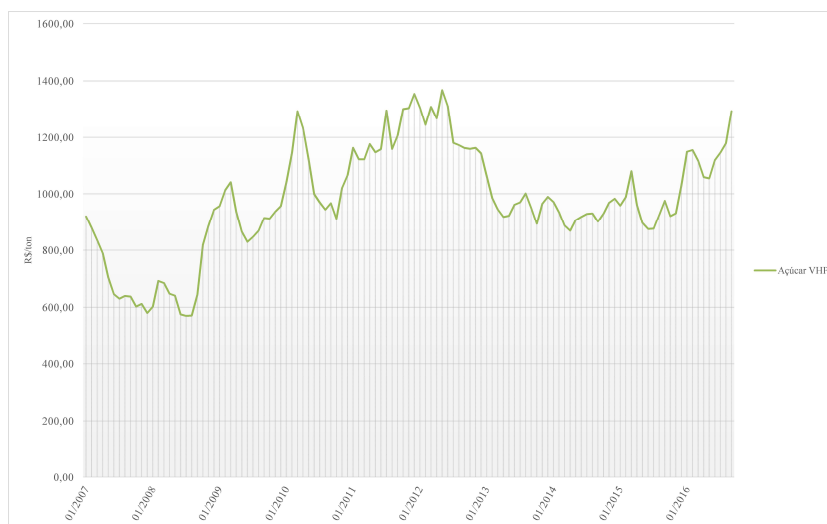


Figura 2.5: Evolução da série histórica dos preços, R\$/ton, do açúcar do tipo VHP no período entre 2007 e 2016

Fonte: CEPEA (2016a)

### 2.3.2 Mercado do álcool

Por sua vez, o funcionamento do mercado de álcool, associado ao mercado de combustíveis e conectado com mercado de açúcar e da cana, é mais complexo. Da mesma forma que o mercado do açúcar, a escolha de produção entre os dois produtos dependerá dos preços relativos. Contudo, a demanda pelo álcool hidratado depende do preço do álcool em relação à gasolina, cujo preço atualmente é fixado com base nos preços internacionais do petróleo e na taxa de câmbio prevalecente.

Os consumidores são extremamente sensíveis ao diferencial de preços entre gasolina e álcool hidratado, e migram de um produto para o outro rapidamente, com impactos sobre a demanda do álcool. Preços maiores desse produto direcionam a cana para a produção de álcool, sendo que, em sentido inverso, aumenta-se a produção de açúcar em detrimento da produção de álcool.

Além disso, a decisão de produção entre álcool hidratado e anidro também depende de seus preços relativos. O álcool anidro tem o mesmo efeito energético que a gasolina A (substitui-a na razão de 1:1), e atualmente é usado como oxigenante desse tipo de gasolina, sendo misturado na proporção de 27% para formar a gasolina C. A mistura é assegurada por lei, o que faz existir uma reserva de mercado para esse produto, atrelada ao consumo de gasolina. Moraes e Shikida (2002) destacam que, por outro lado, a demanda de álcool hidratado depende da frota movida a álcool, ou dos FFV.

A Figura 2.6 apresenta a relação entre os preços do etanol anidro e hidratado nos últimos dez anos. Percebe-se que a precificação dos produtos se dá de forma muito semelhante, com exceção de um curto período em 2011, em qual o etanol anidro ficou mais valorizado. Isto ocorreu por conta da maior oferta de álcool hidratado no mercado, fazendo com que seu preço diminuísse nas usinas. O preço do álcool anidro acompanhou a trajetória de alta da gasolina, uma vez que no período de superoferta do álcool hidratado, sua produção foi menor enquanto sua demanda acompanhou a do combustível fóssil.

A grande penetração de veículos FFV no mercado nacional tornou a demanda por combustíveis automotivos bastante sensível aos preços relativos, ocasionando por vezes movimentos bruscos de migração de um combustível pelo outro, o que aumentou o grau de estresse logístico por conta da imprevisibilidade da demanda. Tradicional exportador, o país precisou realizar importações pontuais de etanol anidro para o atendimento da mistura obrigatória.

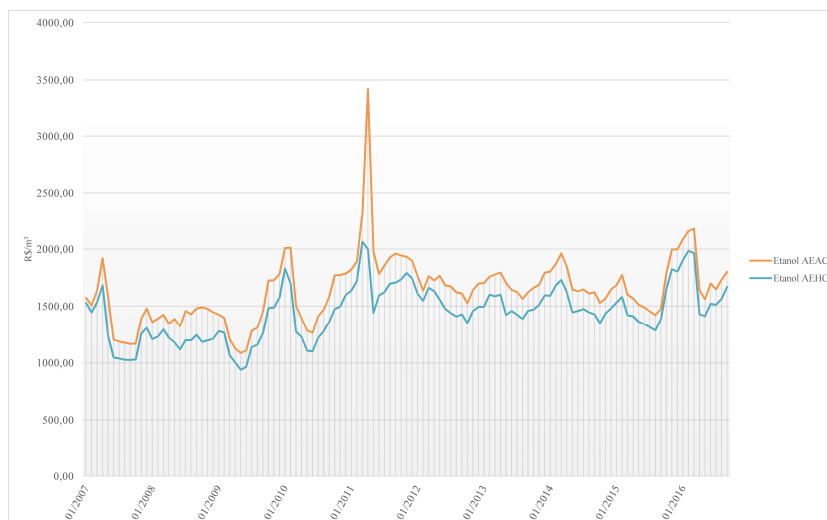


Figura 2.6: Evolução da série histórica dos preços, em R\$/m<sup>3</sup>, do etanol anidro (AEAC) e hidratado (AEHC) no período entre 2007 e 2016

Fonte: CEPEA (2016b)

### 2.3.3 Mercado da energia elétrica

Segundo Walter (1994), a regulamentação que trata da autoprodução de energia elétrica começou a ser definida no país, de maneira tardia, ao longo da década de 1980. Todavia, tal legislação não fazia diferenciação entre a cogeração e outras formas de autoprodução, bem como não condicionava às concessionárias a compra de excedentes, inviabilizando a geração de energia descentralizada. Não havia distinção muito clara acerca das fontes de energia renováveis, muitas vezes estas recebendo a mesma importância dos combustíveis fósseis. Walter e Bajay (1992) ainda destacam que setores como o sucroalcooleiro preocupavam-se basicamente com a eliminação de seus subprodutos, sem se atentarem à eficiência energética da cogeração ou produção de eletricidade em escala.

Conforme pôde ser visto no item Subsubseção 2.2.6, a evolução da geração elétrica nas usinas sucroalcooleiras é observada em três momentos distintos: fase pré-Proálcool, fase da autosuficiência e fase da geração de energia excedente. Neste último período observam-se as mudanças mais profundas do setor elétrico brasileiro, de maneira que foi estabelecido um novo marco institucional com a aprovação da Lei 8.631 no ano de 1993.

Percebe-se, portanto, que o potencial de mercado para a comercialização do excedente de energia elétrica exportável depende fundamentalmente da estrutura do setor elétrico, da disposição dos decisores do setor sucroalcooleiro em investir neste novo negócio

de geração de eletricidade e do interesse das empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica. Tais empresas buscam agregar esta fonte a seu portfólio e disponibilizam-se a remunerar adequadamente a eletricidade contratada (TOLMASQUIM, 2004).

A condição inicial para a implementação de um novo arranjo no setor elétrico foi a desverticalização da cadeia produtiva, conseguida através da separação das atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica. Enquanto a geração e a comercialização foram desreguladas gradativamente, a transmissão e distribuição continuaram sendo tratadas como atividades públicas reguladas. Ainda, com a aprovação das Leis 8.987 e 9.074 no ano de 1995, instituiu-se a figura do Produtor Independente de Energia, com a determinação de livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição.

Em 2001, a crise de abastecimento alertou para a necessidade de introduzir novas fontes de energia primária na matriz energética nacional. A cogeração com base no bagaço de cana mostrou-se a alternativa mais viável no horizonte de curto prazo. O grande potencial de geração elétrica no setor canavieiro motivou o BNDES a lançar o Programa de Apoio à Cogeração e Energia Elétrica a Partir de Recursos da Cana-de-açúcar.

O crescimento da capacidade instalada para a produção de excedentes tem sido contínuo, embora lento em relação ao potencial existente. Além da crise já citada, a profissionalização da administração do segmento sucroalcooleiro, a janela de oportunidades associada à substituição dos sistemas de potência adquiridos no início do *Proálcool* e o avanço das políticas de fomento à geração de eletricidade a partir das fontes renováveis de energia permitirão uma expansão ainda maior da geração elétrica no parque canavieiro.

Cortez (2010) evidencia que a resposta das usinas às mudanças do setor elétrico ficaram aquém das expectativas por conta das tarifas oferecidas não terem sido consideradas atraentes. Entretanto, além da facilidade de inserção da geração por fontes alternativas na matriz elétrica brasileira, a resposta aos leilões abertos de energia tem atraído o setor, contribuindo para a evolução da geração excedente já citada.

Nos Leilões de Energia Nova (LEN) de número 20, praticado em 2014, e os de número 18 e 16, ambos realizados no segundo semestre de 2013, foram negociados mais de 63 TWh em contratos cuja entrega de energia se dará num horizonte de 5 anos, os chamados leilões A-5. Medellín (2015) cita que os empreendimentos que geram eletricidade a partir da biomassa usualmente participam dos Leilões de Energia de Reserva (LER), destinados a aumentar a segurança do fornecimento ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Cabe salientar que no novo arranjo do setor elétrico os leilões são as principais formas de contratação de eletricidade no Brasil. Tratam-se de processos licitatórios, realizados com o intuito de comercializar a energia elétrica necessária para assegurar o pleno atendimento da demanda futura no Ambiente de Contratação Regulada (ACR). Tiveram início no ano

de 2005 e desde então introduziram a competição entre os agentes de geração, contribuindo com a segurança do abastecimento e modicidade tarifária.

Outros ambientes de contratação também são explorados no setor elétrico, como o Ambiente de Contratação Livre (ACL) e o mercado *spot*. Este último, representa grande potencial para as usinas sucroenergéticas dada a perecibilidade do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD), principal referência para valorar a energia elétrica comercializada no curto prazo.

A Figura 2.7 apresenta a evolução dos valores de PLD praticados no último decênio.

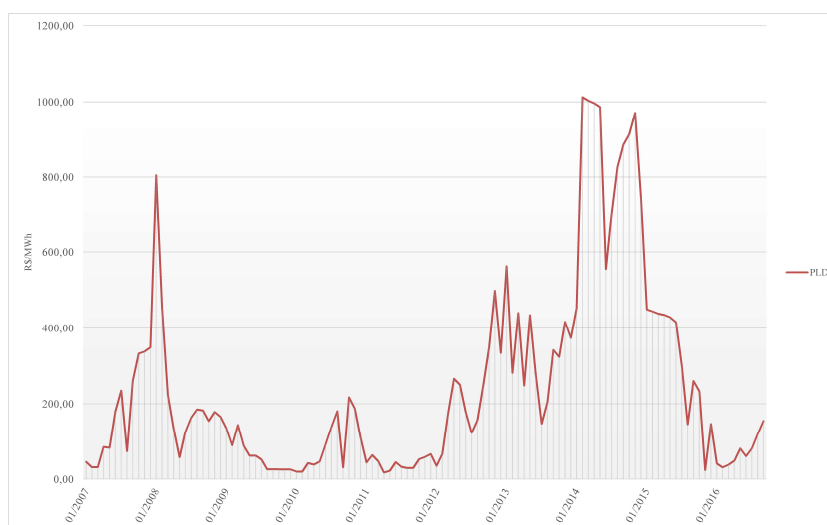


Figura 2.7: Evolução da série histórica do PLD, em R\$/MWh, no período entre 2007 e 2016

Fonte: CCEE (2016)

Observam-se dois picos, o primeiro no ano de 2008 e o segundo durante o biênio 2014-2015, cujos valores de PLD excederam o patamar 700,00 R\$/MWh. Em ambos os períodos ocorreram déficit hídrico, forçando muitas usinas hidrelétricas recorrerem ao mercado *spot* para a compra de energia para o cumprimento de contratos.

A Figura 2.8 apresenta a evolução de preço das *commodities* abordadas neste trabalho. Nela, verifica-se, inclusive, que nas duas ocasiões citadas anteriormente, a energia elétrica apresentou valor superior ao preço do açúcar, *commodity* cujos preços são bem estabelecidos no setor. Tal fato destaca a importância da eletricidade como oportunidade para o setor sucroalcooleiro incrementar seus ganhos. Já os preços do etanol se assemelharam aos do açúcar em duas oportunidades: em 2009 e 2011.

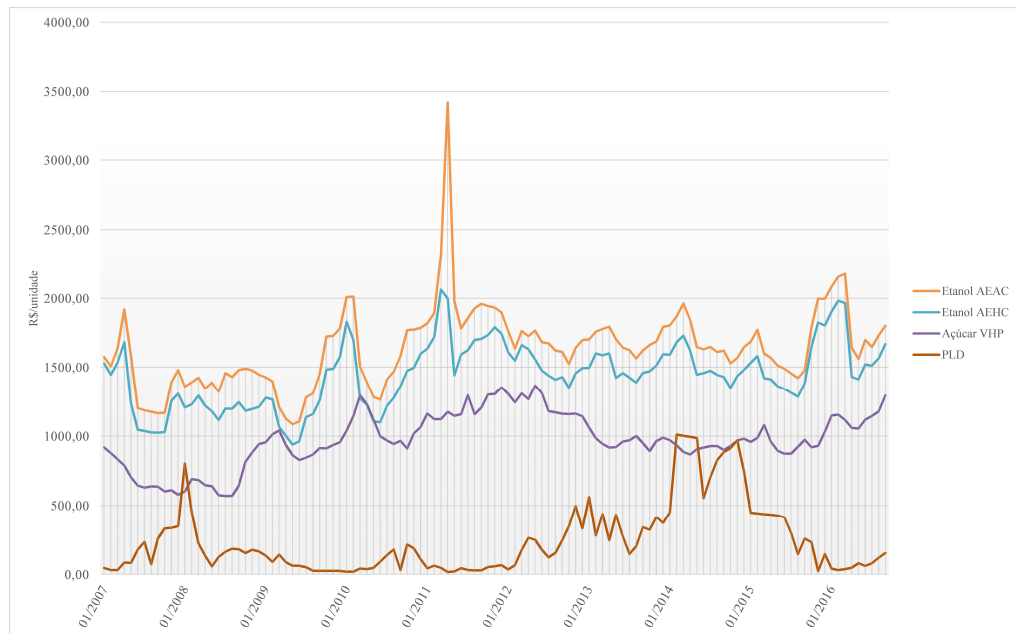


Figura 2.8: Preço das *commodities* açúcar VHP (R\$/ton), AEAC (R\$/m<sup>3</sup>), AEHC (R\$/m<sup>3</sup>) e PLD (R\$/MWh) no período entre 2007 e 2016

## 3 Tópicos de Pesquisa Operacional

Este capítulo apresenta um panorama sobre a Pesquisa Operacional, conceituando-a como ciência e destacando alguns dos principais métodos para a resolução de problemas desta natureza. Evidenciam-se os problemas lineares cujos métodos Simplex e de Pontos Interiores permitem explorar o conjunto de soluções viáveis e, conseqüentemente, a correta alocação de recursos. Alguns exemplos são abordados.

### 3.1 Introdução à Pesquisa Operacional

Pesquisa Operacional (PO), ou pesquisa sobre operações, pode ser definida como abordagem científica aplicada a problemas complexos que compreendem a condução e coordenação das atividades numa organização. A PO permite a tomada de decisões em situações de alocação de recursos.

Segundo Hillier e Lieberman (2013), as origens da PO remontam a décadas, quando se tentou uma abordagem científica da gestão das organizações. Todavia, foi mais precisamente durante a Segunda Guerra Mundial, a partir de ações militares para alocação eficiente de recursos, que a pesquisa científica aplicada adquiriu notoriedade. Os comandos dos exércitos britânico e norte-americano convocaram um grande número de cientistas das mais diversas áreas do conhecimento para lidar com problemas táticos e estratégicos associados às campanhas dos países no conflito. Dentre os especialistas estavam Patrick Blackett, Cecil Gordon, C. H. Waddington, Owen Wansbrough-Jones e Frank Yates, inicialmente designados para avaliação e reposicionamento adequado dos radares do sistema de defesa aéreo britânico. O grupo contribuiu para a vitória dos aliados na Batalha Aérea da Grã-Bretanha, e esforços semelhantes foram verificados nas Batalhas do Atlântico Norte e Campanha Britânica do Pacífico, por intermédio de pesquisas sobre como administrar operações de comboio e sistemas antissubmarinos. Com o final da guerra, alguns anos mais tarde, a aplicação da PO despertou interesse nos mais variados contextos fora do ambiente bélico.

A medida que alguns dos países afetados pela guerra se restabeleciam industrialmente, a necessidade de novas metodologias organizacionais tornava-se aparente. A especialização das organizações, concomitantemente ao aumento da complexidade dos problemas, ajudou a disseminar a PO nos diversos setores econômicos. Para os desenvolvedores de pesquisa, embora sob outros critérios e cenários, os problemas eram praticamente os mesmos enfrentados pelos militares na guerra. Tal fato ajudou a popularizar ainda mais a PO, contribuindo para o progresso substancial de novas técnicas e abordagens. George B. Dantzig, em 1947, desenvolveu o método Simplex para a solução de problemas com programação linear a partir do estudo de equações algébricas aplicadas



às missões aeronáuticas na Segunda Guerra, recém acabada. Alguns anos antes, quando os Estados Unidos resolveram entrar no conflito, Dantzig ingressou para a força aérea americana (USAF) e foi contratado para chefiar a Unidade de Análise de Combate, tendo sido condecorado com medalha e honrarias ao final de seu serviço militar. Neste contexto, o matemático, desenvolveu os chamados “programas”, planejando praticamente toda a operação aérea de seu país, desde a aquisição de materiais de manutenção, frota, armamentos, até o dimensionamento de rotas, cronogramas para treinamento, logística de abastecimento e implantação de homens nas operações. Tais feitos garantiram o sucesso norte americano nas operações de guerra, sagrando este país, juntamente com os aliados, vencedor. Para muitos, Dantzig é considerado o pai da programação linear, por conta da importância do seu método na resolução de problemas de funções lineares de variáveis, muito comuns em diversas aplicações do dia-a-dia. Um exemplo notório desta afirmação, o problema da dieta, foi uma das primeiras aplicações do algoritmo Simplex. Todavia, a PO não limita-se apenas a sistemas lineares: explora problemas com maior grau de complexidade e utiliza-se de metodologias já consagradas para simplificar alguns fenômenos observados e consequentemente fazer inferências sobre os sistemas reais.

De acordo com Rardin (2000), a PO trata de problemas de decisão através da formulação e análise de modelos matemáticos - representações matemáticas ideais pertinentes de problemas característicos. Tais formulações permitem adquirir boa percepção sobre as possíveis soluções.

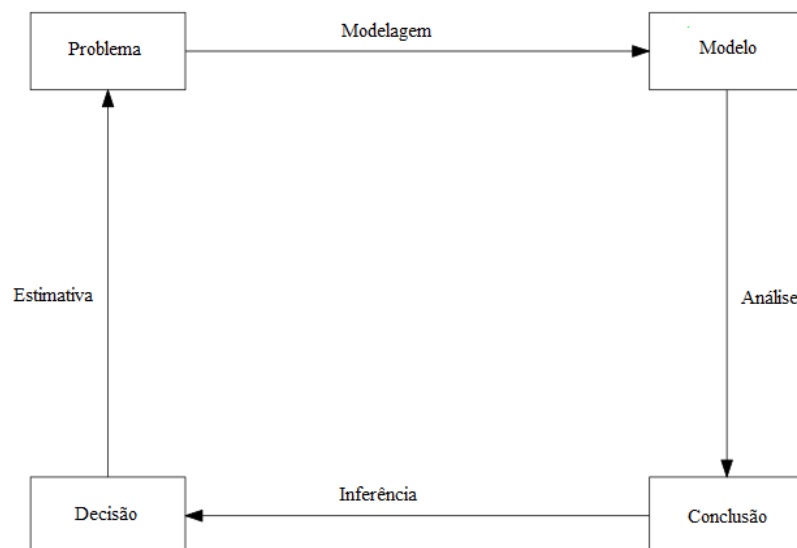


Figura 3.1: Processo da Pesquisa Operacional  
Fonte: Rardin (2000)

Quando se procura refletir sobre uma situação real, na tentativa de explicar, de entender ou de agir sobre ela, um modelo matemático pode surgir. Esta abordagem via de regra traz simplificações que nem sempre condizem com a realidade. Assim, de modo geral, uma hipótese matemática retrata uma situação idealizada da realidade, simplificada o bastante para permitir cálculos, e tem como objetivo o entendimento do fenômeno e possíveis previsões de seu comportamento futuro. Os modelos matemáticos apresentam muitas vantagens em relação a descrição verbal de um problema. Uma delas é que a hipótese algébrica descreve o problema de forma muito mais concisa. Isso tende a tornar compreensível a estrutura geral do problema e ajuda a revelar importantes relacionamentos de causa-efeito. Desse modo, eles indicam mais claramente quais dados adicionais são relevantes para a análise. Também facilitam o tratamento do problema como um todo, considerando todos os seus inter-relacionamentos de forma simultânea. Finalmente, um modelo matemático forma uma ponte para o emprego de técnicas matemáticas e de computacionais para analisar o problema. Um modelo desse tipo é, necessariamente uma abstração do problema, de forma que geralmente requer aproximações e suposições simplificadas para ser possível resolvê-lo (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Hillier e Lieberman (2013) sugerem que ao desenvolver um modelo, o decisor o inicie de forma bem mais simplificada, e progressivamente avance para representações mais elaboradas que reflitam a complexidade do problema real. Para Rardin (2000), o processo inicia-se com a formulação do modelo, a chamada modelagem. Nesta etapa, as variáveis são definidas e os relacionamentos do modelo principal quantificados de forma a descrever o comportamento do sistema físico, a primeira fronteira do processo. A seguir, ocorre a análise propriamente dita, cujas habilidades matemáticas permitem conclusões sobre o modelo sugerido. Para completar o processo, deve-se inferir sobre as conclusões do modelo, isto é, verificar e argumentar se as conclusões são suficientes para inferência dos principais atores nas decisões praticadas pelo problema.

Hillier e Lieberman (2013) sintetizam as fases usuais do estudo da PO:

1. Definição do problema de interesse e coleta de dados;
2. Formulação de um modelo matemático para representar o problema;
3. Desenvolvimento de um procedimento computacional a fim de derivar soluções para o problema com base no modelo;
4. Teste do modelo e aprimoramento do mesmo, conforme necessário;
5. Arranjo e preparo para aplicação contínua do modelo;
6. Implementação.

Rardin (2000) pontua que os conceitos fundamentais na formação de um modelo de pesquisa operacional são: (a) as decisões, abertas aos tomadores de decisão; (b) as restrições, limitantes das escolhas; e (c) os objetivos, fazendo com que algumas decisões sejam preferidas em relação a outras. Uma vez que os modelos de otimização, também chamados de programas matemáticos, representam problemas de escolha como variáveis de decisão, deve-se caracterizar intervalos numéricos para as incógnitas de forma que as soluções sejam consideradas adequadas para o problema, respeitando-se as limitações. Solução factível é aquela que satisfaz todas as restrições, enquanto que uma solução ótima, além de factível, isto é, viável, reproduz a melhor escolha para o objetivo representado por uma função do problema com o mesmo nome.

Além da função objetivo, que revela a essência do problema em termos do equacionamento matemático das variáveis de decisão, os problemas de PO são enunciados em função das expressões algébricas que simbolizam as limitações do sistema. Tanto o conjunto das variáveis de restrição, quanto o conjunto formado pelas variáveis presentes na função objetivo, pode ser definido por constantes que determinam os resultados de saída do modelo, os chamados “outputs”. A análise de sensibilidade explora tais resultados, avaliando como estes dependem dos valores escolhidos como parâmetros. A Figura 3.2, a seguir, ilustra as fronteiras<sup>2</sup> do sistema.

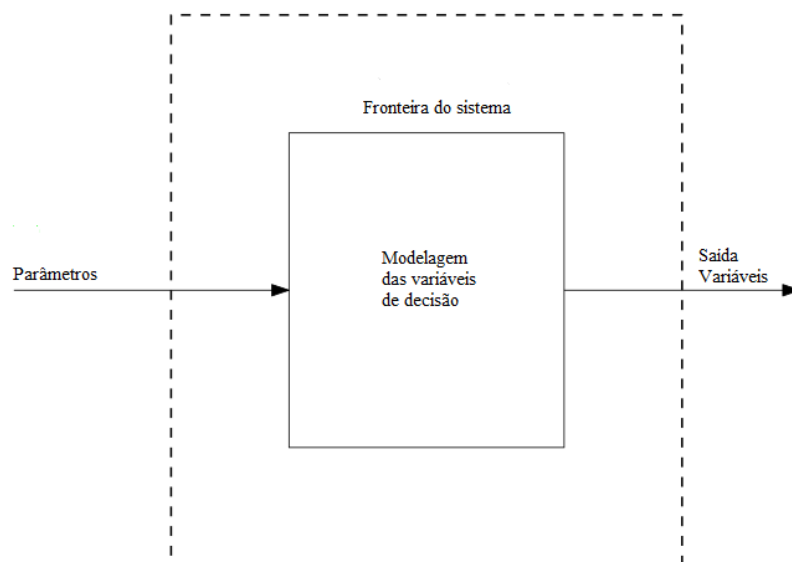


Figura 3.2: Fronteiras do sistema  
Fonte: Rardin (2000)

<sup>2</sup>A linha tracejada, tida como fronteira do sistema, representa o conjunto de combinações convexas do problema de tal forma que a sua solução seja factível.

A busca da solução ótima é um tema bastante relevante na PO. Geralmente, quando define-se uma solução como ótima, a solução é a melhor possível apenas em função do modelo que está sendo adotado. Visto que, como dito anteriormente, o modelo necessariamente é uma idealização e não uma representação exata da realidade, não há garantia de que a solução otimizada se comprove como a melhor possível no mundo concreto. Existem muitos fatores imponderáveis e incertezas associadas aos problemas práticos, de tal sorte que, se o modelo for bem formulado e testado, as soluções resultantes tendem a ser uma boa aproximação para o caso real. Para Hillier e Lieberman (2013), deve-se tomar cuidado para garantir que o modelo permaneça uma representação válida do problema. Ainda, segundo os autores, o próprio critério para julgar a validade de um modelo é se o mesmo prevê ou não os efeitos relativos dos caminhos alternativos com precisão suficiente para permitir uma decisão sensata. A análise de pós-otimalidade, estudo feito após encontrar-se a melhor solução, vai de encontro a este objetivo.

### 3.2 Programação Linear

Para Hillier e Lieberman (2013), o desenvolvimento da Programação linear (PL) tem sido classificado entre os mais importantes avanços científicos dos meados do século XX e, cujo impacto, a partir dos anos 1950, tem sido extraordinário. Luenberger (2004) introduz o conceito de PL como um programa matemático de funções. O autor pondera que um problema desta natureza é caracterizado, como o próprio nome sugere, por uma função linear de variáveis desconhecidas: a função objetivo, linear nas incógnitas; e as restrições, equações ou inequações também lineares. Em termos de propriedades matemáticas e computacionais, existem classes muito mais amplas de problemas de otimização. Todavia, a popularidade dos modelos de PL reside principalmente na fase de formulação e análise do problema. Outra razão consiste no fato das formas lineares para as restrições e funções objetivos serem, frequentemente, menos difíceis de se definir. Segundo Hillier e Lieberman (2013), o adjetivo linear significa que todas as funções matemáticas nesse modelo são necessariamente funções lineares, representadas a partir de equações ou inequações de primeiro grau. Frente a este contexto, a PL trata do planejamento ótimo das atividades, situação atingida quando o resultado esperado do modelo assume o melhor objetivo especificado entre todas as alternativas elegíveis.

De forma geral, a preocupação fundamental da PL é o estudo do comportamento de um sistema, ou conjunto complexo, onde pressupõe-se que este sistema seja decomposto em funções elementares. Tais aplicações consistem em reproduzir um conjunto de produtos a partir de um determinado conjunto de fatores, muitas vezes caracterizados por terem suas proporções bem definidas. A medida quantitativa de cada atividade é chamada de “nível de atividade”, sendo possível associar a cada uma delas uma margem

de valor, ou lucro. Wolsey (1998) cita outros problemas práticos que podem ser solucionados através da abordagem linear, como a programação de comboios de trens, definição da tripulação de uma aeronave, planejamento da produção industrial, planejamento do despacho hidráulico, escalonamento do transporte coletivo para deficientes, detalhamento do corte de matérias-primas e análogos.

Para problemas de otimização, principalmente os encontrados em administração, economia e na indústria, o interesse primordial é a tomada de decisões que irá maximizar ou minimizar algumas quantidades. São de particular importância os problemas de Programação Matemática que dizem respeito ao aproveitamento, ou alocação, de recursos escassos e usos alternativos, de forma a satisfazer determinados objetivos. A solução que satisfaz simultaneamente as condições do problema e do objetivo é chamada de solução ótima (PASSOS, 2009).

### 3.2.1 Definição do problema de PL

Matematicamente, um problema de PL consiste em determinar os valores do vetor  $\vec{x}$  que tornam máximo ou mínimo o valor de uma função linear  $z$ , chamada de função objetivo, conforme pode ser visto nas Equações 3.1, 3.2 e 3.3.

Garfinkel e Nemhauser (1972) definem<sup>3</sup>:

$$\max z = \vec{c}\vec{x} \quad (3.1)$$

$$\text{s.a. } A\vec{x} = \vec{b} \quad (3.2)$$

$$\vec{x} \in R_+^n \quad (3.3)$$

onde:

$z$  é a função objetivo;

$\vec{c}$  é um vetor  $(1 \times n)$ ;

$\vec{b}$  é um vetor  $(m \times 1)$ ;

$A$  é uma matriz  $(m \times n)$ ;

$R_+^n$  é o espaço de vetores de dimensão  $n$  com componentes reais não negativos

Um vetor  $\vec{x}$  que satisfaça a Equação 3.2 é chamado solução do PL. Além disso, ao respeitar a condição presente na Equação 3.3, a solução é dita factível. Dado um PL, existem três possibilidades mutualmente exclusivas:

---

<sup>3</sup>A PL pode ser definida tanto na forma de maximização de uma função objetivo, quanto de minimização da mesma função, dependendo da natureza do problema. Minimizar uma função  $z$  é equivalente a maximizar a sua expressão negativa.

1. Não existe solução factível. Neste caso o problema é chamado de *infactível*.
2. Existem vetores  $\vec{x}$  e  $\vec{y}$  de tal modo que  $\vec{c}\vec{y} > 0$  e  $\vec{x} + \alpha$  é uma solução viável para todos os escalares  $\alpha$  não-negativos. Neste caso,  $\vec{x}^*$  pode ser arbitrariamente grande, e o problema é dito *ilimitado*.
3. Há uma solução viável  $\vec{x}^*$  com  $\infty > \vec{c}\vec{x}^* \geq \vec{c}\vec{x}$  para todas as soluções  $\vec{x}$  viáveis. Neste caso  $\vec{x}^*$  é chamado solução *ótima*.

O caso 3 demanda maior atenção.

### 3.3 Exemplos de modelos em PL

Este item versa sobre a aplicação da PL na resolução de problemas comuns ao planejamento de atividades, alocação de recursos e fenômenos econômicos, citados no início do capítulo. Conforme será visto, para algumas classes de problemas mais usuais, as formulações matemáticas são simplificadas e as respostas dos modelos fornecem estimativas razoáveis. O problema do despacho energético nas usinas canavieiras, levando-se em consideração a produção dos principais derivados de um insumo em comum, a cana-de-açúcar, assemelha-se aos problemas da análise de atividades e multiproduto, discutidos conforme segue.

O primeiro exemplo abordado, o problema da análise das atividades, consiste em determinar as componentes do vetor  $\vec{x}$  que maximizam a função objetivo  $z$ . O problema é definido conforme as Equações 3.4, 3.5 e 3.6.

**Exemplo 1:** Problema da análise das atividades.

$$\max z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (3.4)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad (3.5)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j \geq 0 \quad (3.6)$$

Supondo que as atividades representem a fabricação de produtos, têm-se para todo  $j$  e para todo o valor de  $i$ :

- $b_i$  quantidade do recurso  $i$  disponível para as  $n$  atividades, com  $b_i \geq 0$ , para qualquer valor de  $i$ ;
- $x_j$  nível de produção da atividade  $j$ ;
- $c_j$  lucro na produção da atividade  $j$ ;
- $a_{ij}$  quantidade de recurso  $i$  necessário à produção de uma unidade de produto a partir da atividade  $j$ .

Apesar da estrutura apresentada ser bem elegível, algumas observações devem ser feitas em relação ao modelo:

1. A função objetivo  $z$  a ser maximizada representa o lucro total da empresa nas  $n$  atividades.
2. O primeiro grupo de restrição indica o total gasto de recurso  $i$  nas atividades  $j$ , num total de  $m$ .
3. O segundo grupo de restrição, as chamadas restrições não-negativas, eliminam a possibilidade de níveis negativos.

Luenberger (2004) descreve este problema como o problema de planejamento da manufatura. Assumindo a linearidade das instalações da planta industrial disponível, deseja-se maximizar a quantidade de produtos fabricados de forma a obter a melhor receita econômica, respeitando-se as quantidades de matérias primas disponíveis e a capacidade de produção para cada unidade. Hillier e Lieberman (2013) classificam o mesmo problema como *mix* de produtos.

Outros tipos de modelos também abordam a alocação de recursos ou quantidades. O modelo dos transportes tem por objetivo minimizar o custo total do transporte necessário para atender aos centros distribuidores. Já o chamado problema do multiperíodo envolve a estocagem de quantidades de produtos de um dado período temporal para o seguinte.

O próximo exemplo, Equações 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10, é chamado de problema do *multiproduto*. Passos (2009) considera a manufatura de diferentes produtos numa mesma empresa com diversas fábricas, a partir de um conjunto limitado de recursos. O problema é modelado a partir do custo de produção  $c_{kj}$  do produto  $j$  na fábrica  $k$ ;  $b_i$  a disponibilidade do insumo  $i$  na fábrica  $k$ ;  $d_j$  a quantidade total a ser produzida do produto  $j$  (demanda) e  $a_{ij}$  o coeficiente de produção do recurso  $i$  para o produto  $j$  supostamente comum entre as fábricas; de tal forma que as variáveis  $x_{kj}$  minimizam o custo total de produção satisfazendo as demandas e utilizando os recursos disponíveis em cada fábrica:

**Exemplo 2:** Problema do multiproduto.

$$\min w = \sum_k c_k x_k \quad (3.7)$$

$$\text{s.a. } Ax_k = b_k, \quad \forall k \quad (3.8)$$

$$\sum x_k = d \quad (3.9)$$

$$x_k \geq 0, \quad \forall k \quad (3.10)$$

Nota-se que:

1. A função objetivo  $w$  a ser minimizada representa o custo total de produção da empresa na fábrica  $k$ .
2. O primeiro grupo de restrição indica a utilização de todos os recursos disponíveis na produção do produto  $j$  a partir da disponibilidade de insumo  $i$ , representado pelo produto das variáveis  $a_{ij}$ , na forma da matriz esparsa  $A$ , e  $x_k$ .
3. O segundo grupo de restrição retrata demanda  $d$  a ser atendida na produção do produto  $j$ ;
4. O terceiro grupo de restrição apresenta as chamadas restrições não-negativas, que eliminam a possibilidade de níveis negativos.

De forma geral, como pôde ser visualizado através dos exemplos, a preocupação fundamental da PL é o estudo do comportamento de um conjunto complexo ou sistema, onde pressupõe-se que este seja decomposto em funções elementares, ou atividades. Uma atividade consiste em produzir certo conjunto de produtos a partir de um determinado conjuntos de fatores. Tais atividades são diretamente proporcionais entre seus bens (PASSOS, 2009).

Silva (2015) complementa que os problemas de otimização lineares, em virtude de sua simplicidade, muitas vezes são tidos como o caminho mais fácil ou, quando se busca generalidade, como a única forma funcional que pode ser aplicável em uma classe de problemas semelhantes.

### 3.3.1 Soluções básicas, soluções ótimas e pontos extremos

Retomando a Equação 3.2, é possível representar  $A$  através da permuta de duas outras matrizes  $B$  e  $N$ , onde a primeira é uma matriz não singular com determinante diferente de zero, chamada básica, e a segunda não básica. A partir desta definição, o vetor de incógnitas  $\vec{x}$  pode ser associado às matrizes através de sua representação  $\vec{x} = \vec{x}_B + \vec{x}_N$



em função das variáveis básicas e não básicas associadas. Assim,  $A\vec{x} = \vec{b}$  pode ser escrita como (Equação 3.11):

$$B\vec{x}_B + N\vec{x}_N = \vec{b} \quad (3.11)$$

A matrizes  $B$  e  $N$  são chamadas de matriz básica e matriz não básica do PL, respectivamente.

Supondo que exista a matriz inversa  $B^{-1}$ , é possível escrever as variáveis básicas  $\vec{x}_B$  em função das não básicas  $\vec{x}_N$ , de tal sorte que (Equação 3.12):

$$\vec{x}_B = B^{-1}\vec{b} - B^{-1}N\vec{x}_N \quad (3.12)$$

Ao solucionar a Equação 3.12, obtém-se as seguintes raízes (Equações 3.13 e 3.14):

$$\vec{x}_B = B^{-1}\vec{b} \quad (3.13)$$

$$\vec{x}_N = 0 \quad (3.14)$$

A solução particular representada acima recebe o nome de solução básica. Adicionalmente, se  $\vec{x}_B \geq 0$  a solução é chamada de básica factível, ou básica viável (SBV). Nesta definição, a matriz  $B$  se refere a base, combinação de  $m$  colunas linearmente independentes no espaço ( $m > n$ ). A solução básica, segundo Luenberger (2004), corresponde a uma expressão do vetor  $b$  como combinação linear destes vetores de base. Se, ainda, uma ou mais variáveis básicas tem valor zero na solução básica, a solução é chamada básica degenerada.

Luenberger (2004) define o teorema de Teorema fundamental da PL:

**Teorema fundamental da programação linear.** *Dado um PL na forma padrão, onde  $A$  é uma matrix  $m \times n$  de ranking  $m$ ,*

1. *se há uma solução factível, existe uma solução básica factível;*
2. *se há uma solução ótima factível, existe uma solução ótima básica factível.*

Do Teorema fundamental da PL tem-se que para cada vetor definido pela função objetivo algum ponto extremo (PE) deverá ser o ótimo. Assim, é possível perceber que ao buscar soluções ideais num problema de PL com uma solução ótima basta olhar apenas os PE. Garfinkel e Nemhauser (1972) pontuam que a caracterização algébrica dos PE é que uma solução viável corresponde a um PE se, e somente se, esta for básica. Passos (2009) destaca que combinação convexa de soluções ótimas é também uma solução ótima.

### 3.3.2 Método Simplex

O método Simplex é um procedimento para a resolução de problemas de PL que foi desenvolvido por George B. Dantzig em conexão com o seu trabalho de planejamento para o governo federal americano. O método Simplex é um processo que permite sair de um PE dado, ou de uma SBV, para um PE adjacente, de tal modo que a função objetivo cresça, ou decresça, quando efetua-se este movimento, até a obtenção de uma solução ótima, ou então a descoberta de que o problema é ilimitado. O método consiste de duas etapas (PASSOS, 2009):

- uma maneira de verificar se determinada SBV é ótima;
- uma maneira de obter outra SBV onde a função objetivo tem um valor melhor.

O algoritmo Simplex descreve uma sequência de passos para se obter a solução de um problema PL, baseado nos critérios estabelecidos anteriormente. A seguir, Passos (2009) descreve resumidamente o algoritmo do método Simplex nos seguintes passos:

1. determinar uma SBV inicial;
2. aplicar o teste de otimalidade. Se a solução for ótima parar. Senão, determinar uma variável não básica que deve entrar na base;
3. aplicar o teste da razão para determinar qual variável básica deve sair da base;
4. obter uma nova SBV e retornar ao 2º passo.

Cabe ressaltar que o método Simplex é um procedimento algébrico, cujos conceitos adjacentes são geométricos. Hillier e Lieberman (2013) definem que para qualquer problema de PL com  $n$  variáveis de restrição, duas soluções viáveis em pontos extremos são adjacentes entre si, caso compartilhem  $n - 1$  limites de restrições. As duas soluções viáveis em pontos extremos são conectadas por um segmento de reta que desce sobre esses mesmos limites de restrições compartilhados. Tal segmento é conhecido como lado da região de soluções viáveis. Para o teste de otimalidade, se um PL cuja solução ótima viável em ponto extremo não possuir nenhuma solução adjacente da mesma natureza que seja melhor, então esta têm de ser uma solução ótima. Em outras palavras, o teste de otimalidade é utilizado para determinar quando uma solução ótima foi atingida, de maneira que não haja outra solução adjacente, nos pontos extremos, que seja melhor. Ao examinar cada um dos lados da região de soluções viáveis proveniente da SBV em ponto extremo, o método Simplex identifica a taxa de crescimento na função objetivo que seria obtida deslocando-se ao longo do lado, de maneira que entre os lados com uma taxa positiva ele opta por deslocar-se naquele cujo crescimento é maior.

O procedimento algébrico por trás do método baseia-se em sistemas de equações para soluções. Desta maneira, a primeira etapa na configuração do método é a conversão das restrições funcionais de desigualdades em restrições de igualdade equivalentes, a denominada forma aumentada do problema, contando, inclusive, com a adição de variáveis de folga. Uma variável de folga, quando nula na solução atual, encontra-se no limite da restrição para a restrição funcional correspondente. Valores positivos significam soluções na região viável do limite, enquanto soluções negativas denominam soluções inviáveis. Ao solucionar o problema, obtém-se uma solução aumentada para as variáveis originais do problema. Uma solução básica é uma solução em PE aumentada e uma SBV é uma solução em PE factível.

Hillier e Lieberman (2013) destacam que a forma algébrica do método Simplex pode ser descrita manualmente, na chamada *forma tabular*. Tal forma registra somente as informações essenciais, a saber: os coeficientes das variáveis; as constantes dos lados direitos das equações e a variável básica que aparece em cada equação. Permite, assim, destacar os números envolvidos em cálculos matemáticos e registrá-los de forma compacta. Quando uma solução básica é encontrada as variáveis não básicas são configuradas como zero, situação passível de ser verificada na composição do *Tableau*.

### 3.4 Método dos pontos interiores

No ano de 1984, N. Karmarkar apresentou à comunidade científica um novo algoritmo para resolver problemas de PL em tempo polinomial. Uma característica de tal algoritmo é o fato de chegar a uma solução ótima para um problema caminhando através de pontos interiores da região viável ao contrário do algoritmo Simplex, que atinge gerando uma sequência de pontos extremos adjacentes. O artigo de Karmarkar e trabalhos reconhecidos posteriormente deram início a um novo campo chamado de Método dos Pontos Interiores (MPI) (DUTRA, 2004).

Dutra (2004) destaca que os trabalhos em torno do MPI tiveram um maior ímpeto após o reconhecimento de soluções de problemas NP-difícil obtidas em tempo polinomial. Os métodos que têm sido propostos possuem vários ingredientes, incluindo passos do *primal-dual*, funções com barreira e escalonamento de regiões de confiança.

Dutra (2004) salienta que diversos autores tentaram comparar implementações de algoritmos de pontos interiores com o método Simplex, porém não obtiveram tempo de solução competitivo. Com a implementação do método *primal*, verificou-se a primeira evidência computacional de que o MPI pode ser comparado em velocidade com o Simplex. De forma prática, para problemas pequenos o método Simplex tem rendimento satisfatório. O MPI justifica-se particularmente em problemas com grande número de variáveis e maior complexidade computacional. Para Yamakami (2016) este efeito é consequência

do método Simplex possuir muitas iterações pelas arestas, enquanto o MPI possui poucas interações pelos pontos interiores.

A Figura 3.3 ilustra graficamente a diferença entre as direções percorridas pelos algoritmos nas interações para solução de um problema de PL. Como vantagem adicional, o MPI possui a possibilidade de trabalhar com pontos infactíveis durante o processo de otimização, facilitando a identificação de modelos mal formulados.

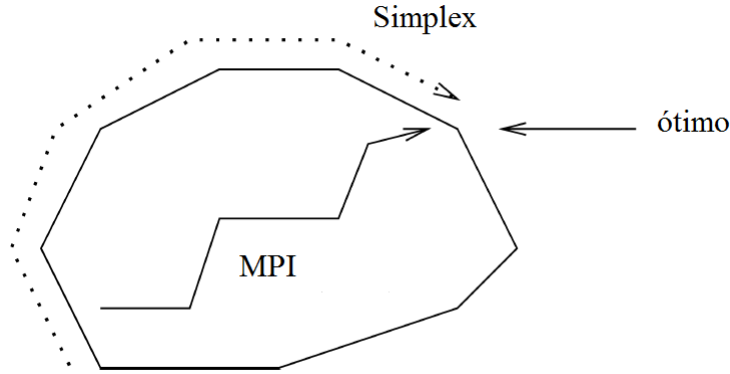


Figura 3.3: MPI, Simplex e ótimo  
Fonte: Yamakami (2016)

O MPI pode ser visto nas formas *primal-dual*, conforme pode ser verificado nas Equações 3.15, 3.16 e 3.17 (*primal*), e 3.18, 3.19 e 3.20 (*dual*). O índice  $t$  indica transposição de matrizes nos equacionamentos.

*Primal:*

$$\min \vec{c}^t \vec{x} \quad (3.15)$$

$$\text{s.a. } A\vec{x} = \vec{b} \quad (3.16)$$

$$\vec{x} \geq 0 \quad (3.17)$$

*Dual:*

$$\max \vec{b}^t \vec{y} \quad (3.18)$$

$$\text{s.a. } A^t \vec{x} = \vec{c} \quad (3.19)$$

$$\forall \vec{y} \quad (3.20)$$

Como condições de otimalidade deve haver a primal factibilidade, expressa pela Equação 3.21, *dual* factibilidade, Equação 3.22, além de uma folga complementar, Equação 3.23.

$$\vec{b} - A\vec{x} = 0, \quad x \geq 0 \quad (3.21)$$

$$\vec{c} - A^t\vec{y} - z, \quad z \geq 0 \quad (3.22)$$

$$x_i z_i = 0 \quad (3.23)$$

Para resolver as formas *primal-dual* são utilizados alguns algoritmos como o Método *Primal-Dual* Clássico, Método *Primal-Afim-Escala*, Método *Dual-Afim-Escala*, Método *Primal-Dual-Afim-Escala*, Método da Barreira Logarítmica entre outros, inclusive funções heurísticas.

### 3.5 Linguagem de modelagem Lingo

Uma linguagem de modelagem matemática é um *software* que foi projetado especificamente para formular, de maneira eficiente, modelos matemáticos grandes, entre os quais os modelos de PL. Mesmo com milhares de restrições funcionais, tipicamente estes limitantes são pouco distintos entre si e seguem um mesmo padrão. De modo análogo, as variáveis decisórias se enquadram em um número pequeno de categorias.

Além de formular eficientemente modelos de grandes proporções, uma linguagem de modelagem agiliza uma série de tarefas de gerenciamento de modelo, como acesso a dados, transformação de dados em parâmetros, modificação e análise de soluções a partir da resolução. Também produzem relatórios sintéticos, bem como documentam o conteúdo do modelo (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Pacotes de otimização são ferramentas para modelagem e resolução de problemas em PL, Programação Inteira, Programação Não Linear dentre outros tipos de abordagem em PO. Os pacotes adotam linguagens de modelagem para a especificação dos equacionamentos matemáticos, de maneira que fornecem ao usuário interfaces para linguagens de programação. Possibilitam a geração de relatórios a partir da exploração de uma solução ótima e seus limites. São exemplos de programas, ou *solvers*, como são conhecidos:

- IBM CPLEX: otimizador robusto, suporta programação em C, C++, Java e Phyton possuindo interface amigável;
- GNU *Linear Programming Kit* (GLPK): otimizador com licença de uso livre, suportando C, C++ e Java;
- XPRESS: ferramenta de modelagem e otimização matemática associada ao programa Visual XPRESS;

- Solver Excel: otimizador associado ao *Microsoft Excel*, cuja interface permite a obtenção da solução ideal em conjunto com a edição de planilhas. Também denominado de ferramenta de análise hipotética;
- GAMS: ambiente para modelagem e solução de problemas de otimização em grande escala. Compreende a linguagem algébrica, o compilador, cujo objetivo é traduzir as informações para o formato aceito pelo *solver*, e o *solver* propriamente dito;
- Gorubi, Lindo, Lingo, entre outros.

O termo *solver*, genérico, refere-se a parte do *software* matemático que resolve um problema. Ao receber a descrição de um problema, editado em determinada linguagem, calcula uma solução para o mesmo.

O **Lingo** é um produto da *Lindo Systems Inc.*, que também comercializa um otimizador tradicional chamado Lindo, além de uma extensão direcionada a planilhas. Um dos grandes motivos da popularidade do Lingo é sua enorme flexibilidade em lidar com uma ampla gama de problemas de PO. Segundo Hillier e Lieberman (2013), o Lingo continua a ser o pacote de *software* mais popular para a resolução de problemas em PO.

Usualmente, prioriza-se no desenvolvimento de modelos de PO a utilização de ferramentas livres, os "*Open Sources*", como são chamados. Entretanto, dada sua importância no contexto da PO, o Lingo é uma plataforma computacional completa, projetada para tornar a construção e resolução de modelos de otimização de forma rápida, fácil e eficiente. Segundo Rangel (2010), o Lingo fornece um pacote completamente integrado que inclui uma poderosa linguagem para expressar modelos de otimização e possui um ambiente cheio de recursos para programação e edição.

Os *solvers* presentes no Lingo podem resolver os problemas de PL através do método Simplex, MPI e métodos mais avançados. Ao compilar um programa, o próprio Lingo faz a escolha do método a ser utilizado, o qual pode ser verificado no momento da execução. O Lingo lê a formulação e seleciona automaticamente o solver apropriado. É possível mudar o método escolhido antes de executar o programa.

São exemplos de *solvers*: *Global Solver*, *General Nonlinear Solver*, *Multistart Solver*, *Barrier Solver*, *Simplex Solvers*, *Mixed Integer Solver* e *Stochastic Solver*.

## 4 Metodologia

Este capítulo tem por objetivo descrever a metodologia utilizada para simular a operação industrial de uma usina sucroenergética com a otimização do *blend*, ou *mix*, de produção. O modelo implementado visa a gestão da fabricação dos principais derivados e subprodutos comerciais da cana-de-açúcar, considerando o aproveitamento de resíduos e a diversificação das fontes energéticas numa planta típica. Como resultado, a maximização das receitas em conjunto com a minimização dos custos econômicos, aferida através da PL (PO), permite a produção das *commodities* privilegiando aquelas cujo perfil maximize o lucro no horizonte de curto prazo.

### 4.1 Descrição e caracterização do objeto de estudo

O complexo Agroindustrial Ferrari iniciou suas atividades na década de 1950, mais precisamente em 1953, fundado por imigrantes italianos. Ele está situado em Pirassununga, na porção Central do Estado de São Paulo, coordenadas geográficas (-21,840851 °;-47,361406 °), na Fazenda da Rocha, km 84 da rodovia SP-215. Além da atividade canavieira, o grupo atua na produção agrícola de grãos em fazendas localizadas no Estado de Mato Grosso (2.000 ha de soja, milho, sorgo entre outros).

A Agroindústria Ferrari, a partir da atividade canavieira, produz as seguintes commodities: açúcar de alta polarização, etanol anidro, etanol hidratado e energia elétrica (cogeração de energia). O açúcar de alta polarização, das sigla em inglês VHP (Very High Polarization), é destinado ao refino e comercializado nos mercados interno e externo. O etanol anidro, Álcool Etílico Anidro Carburante (AEAC), possui até 0,5% de água, sendo utilizado na mistura com a gasolina em substituição ao chumbo-tetra-etila, substância nociva à saúde humana. O etanol hidratado, Álcool Etílico Hidratado Carburante (AEHC), é direcionado ao uso direto nos veículos movidos a álcool e àqueles que possuem tecnologia *flex-fuel*, contendo até 5% de água. Por fim, o excedente de energia elétrica produzido a partir do processo de cogeração de energia na planta industrial pode ser direcionado à rede e comercializado no setor elétrico brasileiro. A Figura 4.1, ilustra os fluxos de produção presentes na planta agroindustrial e apresenta os quatro derivados da cana obtidos ao final do processamento do insumo: açúcar VHP, etanol anidro, etanol hidratado e eletricidade excedente. Vale ressaltar que, em geral, os trabalhos nesta área não fazem distinção entre os tipos de açúcares e álcoois, contabilizando os mesmos de forma agregada.

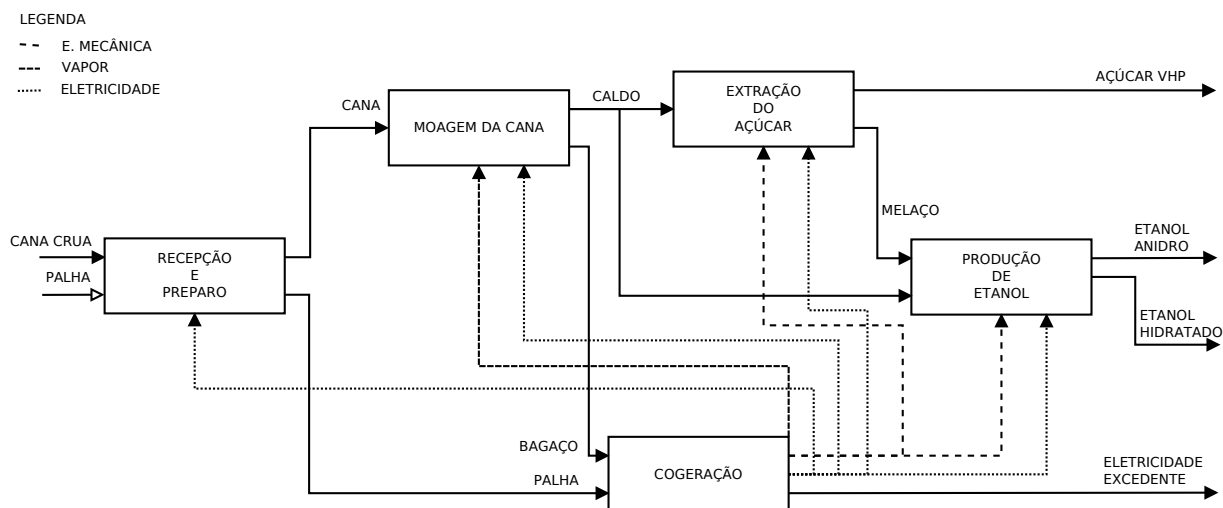


Figura 4.1: Diagrama da produção sucroenergética na Usina Ferrari

Posicionada entre as usinas mais competitivas do setor, sendo a primeira entre cinquenta, no *ranking* de cogeração na safra 2010/2011 (HOFSETZ; SILVA, 2012), a Usina Ferrari conta com aproximadamente 40.000 ha de terras cultiváveis entre próprias, arrendadas e fornecedores. Tem capacidade de moagem diária de 15.000 toneladas de cana, com produção de 1.150 toneladas de açúcar, de 650 metros cúbicos de etanol e 65 MWh de energia elétrica. Emprega 1.500 funcionários diretos e 2.500 trabalhadores indiretos nos municípios em que atua.

A usina possui três grandes clientes diretos: Coopersucar, responsável pela comercialização de todo o açúcar e etanol fabricados; ICC Brazil, responsável pela comercialização de toda a levedura seca; e Tractebel Energia S/A, responsável pela cogeração, distribuição e comercialização de energia elétrica. No ano de 2015, a Agroindústria Ferrari firmou parceria com o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) para a implementação de uma central de pré-processamento da palha, cujo objetivo é promover um melhor aproveitamento deste subproduto nas caldeiras à bagaço.



#### 4.1.1 Formulação do problema

O modelo matemático consiste na reprodução da operação industrial sucroenergética cuja manufatura de bens, a partir de um mesmo recurso, se dá de forma simultânea. Tal formulação é conhecida como problema do *mix* de produção e baseia-se numa variação do *problema de multiprodutos* apresentado na Subseção 3.3. Primeiro será apresentada a formulação genérica do problema e, ao final do capítulo, serão apresentados os equacionamentos detalhados.

O objetivo é alcançar o máximo benefício entre as receitas e os custos da usina, estes últimos, juntamente com os preços de comercialização de cada *commodity*, conhecidos. Considera-se, na abordagem adotada, a produção dos derivados a partir dos subprodutos da cana-de-açúcar com seus respectivos preços de mercado e custos de produção. A Equação 4.1 apresenta a função objetivo com os índices e variáveis correspondentes. Nota-se que embora a eletricidade excedente seja uma *commodity*, a mesma foi quantificada em uma variável a parte, a fim de simplificar a implementação do algoritmo em ferramenta computacional:

$$\begin{aligned}
 \max \big( & \sum_{i=1}^3 (PC_i \cdot XC_i) + (PE \cdot XEE) + \\
 & - \left( \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 (CCR_{ij} \cdot XCR_{ij}) + \right. \\
 & \left. + \sum_{h=1}^3 \sum_{j=1}^2 (CER_{hj} \cdot XER_{hj}) \right) \big)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Onde:

$i$	<i>commodities</i> , $i = 1 \dots 3$ (1: açúcar VHP, 2: etanol anidro, 3: etanol hidratado);
$j$	recursos, $j = 1 \dots 4$ (1: palha, 2: bagaço, 3: caldo, 4: melaço)
$h$	energia, $h = 1 \dots 3$ (1: térmica, 2: mecânica, 3: elétrica);
$PC_i$	preço unitário da <i>commodity</i> $i$ , em R\$ por ton ou m <sup>3</sup> ;
$PE$	preço unitário da <i>commodity</i> eletricidade, em R\$/MWh;
$XC_i$	quantidade da <i>commodity</i> $i$ , em ton ou m <sup>3</sup> ;
$XEE$	quantidade da <i>commodity</i> eletricidade excedente produzida, em MWh;
$CCR_{ij}$	custo da <i>commodity</i> $i$ produzida a partir do recurso $j$ , em R\$/ton;
$XCR_{ij}$	quantidade da <i>commodity</i> $i$ produzida a partir do recurso $j$ , em ton ou m <sup>3</sup> /ton
$CER_{hj}$	custo da energia $h$ produzida a partir do recurso $j$ , em R\$/ton;
$XER_{hj}$	quantidade da energia $h$ produzida a partir do recurso $j$ , em MWh/ton.

Também são avaliadas as demandas energéticas internas para cada relação recurso-*commodity*, bem como os custos correspondentes, conforme pode ser observado no segundo termo da Equação 4.1. A seguir, serão apresentadas as restrições do problema, separadas em subcapítulos para melhor entendimento do conceito de modelagem. As restrições são separadas em grupos cujas equações exploram o atendimento às demandas, de insumos e energia, além das relações de conversão, limites dos recursos e restrições de capacidade e integridade.

#### 4.1.2 Restrição de atendimento às demandas de *commodities*

Ao todo, a usina precisa atender à demanda de produção para três *commodities* a partir dos contratos realizados com a Coopersucar. São elas: açúcar VHP, etanol anidro e etanol hidratado. Abaixo, na Equação 4.2, é possível verificar o equacionamento da restrição de atendimento à demanda.

$$\sum_{j=1}^3 XCR_{ij} \geq DC_i \quad i = 1, \dots, 3 \quad (4.2)$$

Onde:

$DC_i$  demanda da *commodity*  $i$  a ser atendida pela usina, em ton ou m<sup>3</sup>.

### 4.1.3 Restrição de atendimento à demanda energética

O grupo de restrição apresentado na Equação 4.3 refere-se ao atendimento das demandas internas energéticas para a produção de cada derivado da cana-de-açúcar a partir dos recursos disponíveis. O atendimento a estas funções implica não apenas no funcionamento da usina, como também rege o funcionamento da planta agroindustrial em função da melhor alocação de recursos.

$$\sum_{j=1}^4 XER_{hj} \geq DE_h \quad h = 1, \dots, 3 \quad (4.3)$$

Onde:

$DE_h$  demanda da energia  $h$  necessária para a produção sucroenergética, em MWh.

As Equações 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os valores das demandas energéticas, separadas por tipo, para o atendimento das produções das *commodities*. Isto é conseguido variando-se  $h$  de 1 até 3 e calculando a variável  $DE_h$  correspondente.

$$DE_{(h=1)} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^4 (TCR_{ij} \cdot XCR_{ij}) \quad (4.4)$$

$$DE_{(h=2)} = M_{moa} \cdot X_{cana} \quad (4.5)$$

$$DE_{(h=3)} = (E_{rec} + E_{moa}) \cdot X_{cana} + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^4 (ECR_{ij} \cdot XCR_{ij}) + E_{aux} \quad (4.6)$$

Onde:

$DE_{(h=1)}$	demanda de energia térmica necessária na usina, em MWh;
$DE_{(h=2)}$	demanda de energia mecânica necessária na usina, em MWh;
$DE_{(h=3)}$	demanda de energia elétrica necessária na usina, em MWh;
$TCR_{(i,j)}$	energia térmica (vapor de processo) para produzir a <i>commodity</i> $i$ a partir do recurso $j$ , em MWh/ton;
$M_{moa}$	quantidade de energia mecânica consumida para a moagem de 1 tonelada de cana, em MWh;
$X_{cana}$	quantidade de cana-de-açúcar (matéria-prima) disponível para moagem, em ton;
$ECR_{i,j}$	quantidade da energia elétrica para produzir a <i>commodity</i> $i$ a partir do recurso $j$ , em MWh/ton;
$E_{rec}$	quantidade da energia elétrica consumida na etapa de recepção, em MWh;
$E_{moa}$	quantidade de energia elétrica consumida na etapa de moagem, em MWh;
$E_{aux}$	demanda elétrica auxiliar consumida na usina, em MWh.

#### 4.1.4 Restrições de recursos

O grupo de equações a seguir, apresenta as relações de produção entre os recursos e as *commodities* produzidas, bem como os recursos e as demandas energéticas necessárias. Essas relações são obtidas através dos rendimentos para cada relação recurso-*commodity* e recurso-energia. A Equação 4.7 mostra a relação recurso-*commodity*, enquanto a Equação 4.8 ilustra a relação recurso-energia e a Equação 4.9 contabiliza o total produzido. A Equação 4.10 apresenta o caso específico da *commodity* eletricidade excedente cujo valor é a diferença do total de energia elétrica produzida e a demanda necessária para cada etapa de produção.

$$XCR_{ij} = XRC_{ji} \cdot \eta RC_{ji} \quad (4.7)$$

$$XER_{hj} = XRE_{jh} \cdot \eta RE_{jh} \quad (4.8)$$

$$XC_i = \sum_{j=1}^4 XCR_{ij} \quad (4.9)$$

$$XEE = \sum_{j=1}^2 XER_{hj} - DE_h \quad \text{para } h = 3 \quad (4.10)$$

Onde:

$XRC_{ji}$	quantidade do recurso $j$ necessária para a produzir a <i>commodity</i> $i$ , em ton;
$XRE_{jh}$	quantidade do recurso $j$ necessária para a produção da energia, em ton $h$ ;
$\eta RC_{ji}$	matriz de transformação do recurso $j$ para a <i>commodity</i> $i$ , em ton por ton ou m <sup>3</sup> ;
$\eta RE_{jh}$	matriz de transformação do recurso $j$ para a energia $h$ , em ton/MWh;

Além do grupo de restrições acima, deve-se atender a condicionante a seguir, expressa na Equação 4.11. Ela trata do limite dos recursos  $j$ , uma vez que são frações de um mesmo insumo, a cana-de-açúcar, restringidos pela quantidade de matéria-prima disponível e a capacidade de moagem, cujo valor é constante.

$$\sum_{i=1}^3 XRC_{ji} + \sum_{h=1}^3 XRE_{jh} \leq XR_j \cdot X_{cana} \quad j = 1, \dots, 4 \quad (4.11)$$

$XR_j$  quantidade de recurso  $j$  disponível para cada tonelada de matéria-prima processada, em ton.

#### 4.1.5 Restrições de não-negatividade

Além das demandas para as *commodities* serem positivas, uma vez que a usina deve atender a contratos de venda, as quantidades de recursos, assim como as demandas energéticas para produzir cada derivado, deve ser positiva. Em algumas situações as variáveis podem ser nulas, uma vez que determinado recurso é restrito a produção de uma ou outra *commodity* apenas, a exemplo do caldo da cana que produz os açúcares e álcoois, mas não participa da produção energia elétrica. A Equação 4.12 apresenta as relações de não-negatividade.

$$XC_i, XR_j, XCR_{ij}, XER_{hj} \geq 0 \quad \text{para } i = 1, \dots, 3; \quad j = 1, \dots, 4 \quad \text{e } h = 1, \dots, 3. \quad (4.12)$$

## 4.2 Modelo matemático

Ao todo, a formulação geral do problema de PL na plataforma do sistema de modelagem Lingo conta com a participação de 57 variáveis, 44 restrições lineares e 147 de não-negatividade. Através deste cálculo, o *software* quantifica as variáveis e as restrições por tipo, exibindo as dimensões do modelo. O tempo de execução médio do programa é de 6 ms com doze iterações.

Para validação do modelo foram utilizados os dados disponibilizados pela usina para o período presente, bem como os preços das *commodities* na cotação atual.

O diagrama do modelo adaptado à realidade da usina, já levando em consideração o equacionamento matemático, é apresentado na Figura 4.2 abaixo.

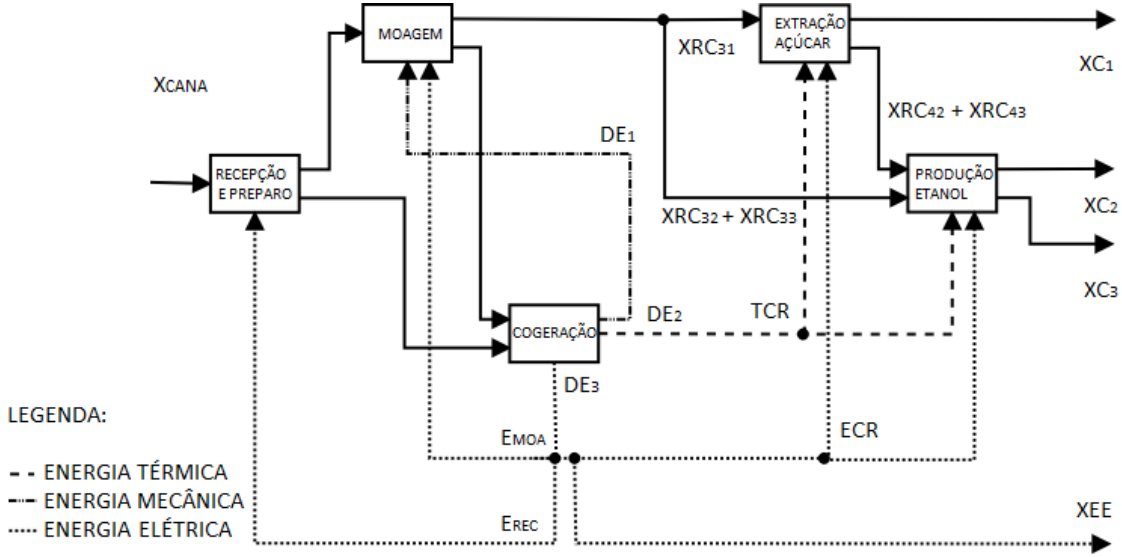


Figura 4.2: Diagrama de fluxo de processo do complexo Ferrari

#### 4.2.1 Equacionamento matemático detalhado

Esta seção apresenta o detalhamento das funções matemáticas exploradas neste capítulo. Os vetores e matrizes são indexados de maneira que a formulação apresente na íntegra cada linha de programação, seja da função objetivo, ou então das restrições com suas respectivas variáveis.

A Equação 4.13 atualiza a função objetivo definida na Equação 4.1:

$$\begin{aligned}
 \max & ((PC_1 \cdot XC_1 + PC_2 \cdot XC_2 + PC_3 \cdot XC_3) + \\
 & (PE \cdot XEE) - (((CCR_{1,3} \cdot XCR_{1,3}) + \\
 & (CCR_{2,3} \cdot XCR_{2,3} + CCR_{2,4} \cdot XCR_{2,4}) + \\
 & (CCR_{3,3} \cdot XCR_{3,3} + CCR_{3,4} \cdot XCR_{3,4})) + \\
 & ((CER_{1,1} \cdot XER_{1,1} + CER_{1,2} \cdot XER_{1,2}) + \\
 & (CER_{2,1} \cdot XER_{2,1} + CER_{2,2} \cdot XER_{2,2}) + \\
 & (CER_{3,1} \cdot XER_{3,1} + CER_{3,2} \cdot XER_{3,2}))))
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Onde:

$PC_1, XC_1$	preço unitário e quantidade produzida da <i>commodity</i> açúcar VHP;
$PC_2, XC_2$	preço unitário e quantidade produzida da <i>commodity</i> etanol anidro;
$PC_3, XC_3$	preço unitário e quantidade produzida da <i>commodity</i> etanol hidratado;
$PE$	preço unitário da <i>commodity</i> eletricidade;
$XEE$	volume da <i>commodity</i> eletricidade excedente produzido;
$CCR_{1,3}, XCR_{1,3}$	custo e quantidade da <i>commodity</i> açúcar VHP produzida a partir do recurso caldo;
$CCR_{2,3}, XCR_{2,3}$	custo e quantidade da <i>commodity</i> etanol anidro produzida a partir do recurso caldo;
$CCR_{2,4}, XCR_{2,4}$	custo e quantidade da <i>commodity</i> etanol anidro produzida a partir do recurso melaço;
$CCR_{3,3}, XCR_{3,3}$	custo e quantidade da <i>commodity</i> etanol hidratado produzida a partir do recurso caldo;
$CCR_{3,4}, XCR_{3,4}$	custo e quantidade da <i>commodity</i> etanol hidratado produzida a partir do recurso melaço;
$CER_{1,1}, XER_{1,1}$	custo e quantidade de energia térmica produzida a partir do recurso palha;
$CER_{1,2}, XER_{1,2}$	custo e quantidade de energia térmica produzida a partir do recurso bagaço;
$CER_{2,1}, XER_{2,1}$	custo e quantidade de energia mecânica produzida a partir do recurso palha;
$CER_{2,2}, XER_{2,2}$	custo e quantidade de energia mecânica produzida a partir do recurso bagaço;
$CER_{3,1}, XER_{3,1}$	custo e quantidade de energia elétrica produzida a partir do recurso palha;
$CER_{3,2}, XER_{3,2}$	custo e quantidade de energia elétrica produzida a partir do recurso bagaço;

Na sequência, serão atualizadas as Equações 4.2 e 4.3 para as Equações 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19 correspondentes.

$$XCR_{1,3} \geq DC_1 \quad (4.14)$$

$$XCR_{2,3} + XCR_{2,4} \geq DC_2 \quad (4.15)$$

$$XCR_{3,3} + XCR_{3,4} \geq DC_3 \quad (4.16)$$

$$XER_{1,1} + XER_{1,2} \geq DE_1 \quad (4.17)$$

$$XER_{2,1} + XER_{2,2} \geq DE_2 \quad (4.18)$$

$$XER_{3,1} + XER_{3,2} \geq DE_3 \quad (4.19)$$

Onde:

$DC_1$  demanda da *commodity* açúcar VHP a ser atendida pela usina.

$DC_2$  demanda da *commodity* etanol anidro a ser atendida pela usina.

$DC_3$  demanda da *commodity* etano hidratado a ser atendida pela usina.

$DE_1$  demanda da energia térmica necessária para a produção sucroenergética.

$DE_2$  demanda da energia mecânica necessária para a produção sucroenergética.

$DE_3$  demanda da energia elétrica necessária para a produção sucroenergética.

O grupo de restrições, a seguir, expresso nas Equações 4.20, 4.21 e 4.23 referem-se às restrições de atendimento as demandas energéticas da planta industrial, de acordo com as Equações 4.4, 4.5 e 4.6.

$$\begin{aligned} DE_1 = & ((TCR_{1,3} \cdot XCR_{1,3} + TCR_{2,3} \cdot XCR_{2,3}) + \\ & + (TCR_{2,4} \cdot XCR_{2,4} + TCR_{3,3} \cdot XCR_{3,3}) + \\ & + (TCR_{3,4} \cdot XCR_{3,4})) \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$DE_2 = M_{moa} \cdot X_{cana} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} DE_3 = & (E_{rec} + E_{moa}) \cdot X_{cana} + \\ & + ((ECR_{1,3} \cdot XCR_{1,3} + ECR_{2,3} \cdot XCR_{2,3}) + \\ & + (ECR_{2,4} \cdot XCR_{2,4} + ECR_{3,3} \cdot XCR_{3,3}) + \\ & + (ECR_{3,4} \cdot XCR_{3,4})) + E_{aux} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Onde:



$TCR_{1,3}, ECR_{1,3}$	energias térmica e elétrica para produzir a <i>commodity</i> açúcar VHP a partir do recurso caldo;
$TCR_{2,3}, ECR_{2,3}$	energias térmica térmica e elétrica para produzir a <i>commodity</i> etanol anidro a partir do recurso caldo;
$TCR_{2,4}, ECR_{2,4}$	energias térmica térmica e elétrica para produzir a <i>commodity</i> etanol anidro a partir do recurso melaço;
$TCR_{3,3}, ECR_{3,3}$	energias térmica térmica e elétrica para produzir a <i>commodity</i> etanol hidratado a partir do recurso caldo;
$TCR_{3,4}, ECR_{3,4}$	energias térmica térmica e elétrica para produzir a <i>commodity</i> etanol hidratado a partir do recurso melaço;

As Equações 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36 e 4.37 retratam as restrições associadas aos recursos, bem como cada conversão recurso-*commodity* e recurso-energia, conforme explorado nas Equações 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10.

$$XCR_{1,3} = XRC_{3,1} \cdot \eta RC_{3,1} \quad (4.23)$$

$$XCR_{2,3} = XRC_{3,2} \cdot \eta RC_{3,2} \quad (4.24)$$

$$XCR_{2,4} = XRC_{4,2} \cdot \eta RC_{4,2} \quad (4.25)$$

$$XCR_{3,3} = XRC_{3,3} \cdot \eta RC_{3,3} \quad (4.26)$$

$$XCR_{3,4} = XRC_{4,3} \cdot \eta RC_{4,3} \quad (4.27)$$

$$XER_{1,1} = XRE_{1,1} \cdot \eta RE_{1,1} \quad (4.28)$$

$$XER_{1,2} = XRE_{2,1} \cdot \eta RE_{2,1} \quad (4.29)$$

$$XER_{2,1} = XRE_{1,2} \cdot \eta RE_{1,2} \quad (4.30)$$

$$XER_{2,2} = XRE_{2,2} \cdot \eta RE_{2,2} \quad (4.31)$$

$$XER_{3,1} = XRE_{1,3} \cdot \eta RE_{1,3} \quad (4.32)$$

$$XER_{3,2} = XRE_{2,3} \cdot \eta RE_{2,3} \quad (4.33)$$

$$XC_1 = XCR_{1,3} \quad (4.34)$$

$$XC_2 = XCR_{2,3} + XCR_{2,4} \quad (4.35)$$

$$XC_3 = XCR_{3,3} + XCR_{3,4} \quad (4.36)$$

$$XEE = (XER_{3,1} + XER_{3,2}) - DE_3 \quad (4.37)$$

Onde:

$XRC_{3,1}, \eta RC_{3,1}$	quantidade e coeficiente de transformação caldo-açúcar VHP;
$XRC_{3,2}, \eta RC_{3,2}$	quantidade e coeficiente de transformação caldo-etanol anidro;
$XRC_{4,2}, \eta RC_{4,2}$	quantidade e coeficiente de transformação melaço-etanol anidro;
$XRC_{3,3}, \eta RC_{3,3}$	quantidade e coeficiente de transformação caldo-etanol hidratado;
$XRC_{4,3}, \eta RC_{4,3}$	quantidade e coeficiente de transformação melaço-etanol hidratado;
$XRE_{1,1}, \eta RE_{1,1}$	quantidade e coeficiente de transformação palha-vapor;
$XRE_{1,2}, \eta RE_{1,2}$	quantidade e coeficiente de transformação palha-energia mecânica;
$XRE_{1,3}, \eta RE_{1,3}$	quantidade e coeficiente de transformação palha-eletricidade;
$XRE_{2,1}, \eta RE_{2,1}$	quantidade e coeficiente de transformação bagaço-vapor;
$XRE_{2,2}, \eta RE_{2,2}$	quantidade e coeficiente de transformação bagaço-energia mecânica;
$XRE_{2,3}, \eta RE_{2,3}$	quantidade e coeficiente de transformação bagaço-eletricidade;

Por fim, as Equações 4.38, 4.39, 4.40 e 4.41 tratam da restrição presente na Equação 4.11.

$$XRE_{1,1} + XRE_{1,2} + XRE_{1,3} \leq XR_1 \cdot X_{cana} \quad (4.38)$$

$$XRE_{2,1} + XRE_{2,2} + XRE_{2,3} \leq XR_2 \cdot X_{cana} \quad (4.39)$$

$$XRC_{3,1} + XRC_{3,2} + XRC_{3,3} \leq XR_3 \cdot X_{cana} \quad (4.40)$$

$$XRC_{4,2} + XRC_{4,3} \leq XR_4 \cdot X_{cana} \quad (4.41)$$

Ao final, conforme a compilação e execução do algoritmo gerado pelo modelo matemático, será montada a uma Tabela, conforme modelo apresentado na Tabela 4.1, abaixo, com o resumo das principais variáveis de saída.

Tabela 4.1: Variáveis de saída do modelo

Variável de saída	Unidade
Lucro do operacional	R\$
Quantidade da <i>commodity</i> açúcar VHP produzida ( $XC_1$ )	ton
Quantidade da <i>commodity</i> etanol anidro produzida ( $XC_2$ )	m <sup>3</sup>
Quantidade da <i>commodity</i> etanol hidratado produzida ( $XC_3$ )	m <sup>3</sup>
Quantidade da <i>commodity</i> eletricidade produzida ( $XEE$ )	MWh
<i>Mix</i> de produção ( $XR_3, XRC_{3,1}, XRC_{3,2}$ e $XRC_{3,3}$ )	% açúcar/álcool

## 5 Estudos de casos e análise de resultados

Neste capítulo, serão apresentados três estudos de casos simulando a operação de uma usina conforme o comportamento dos preços das *commodities* nos mercados. Serão, também, listadas as principais premissas do modelo bem como os dados de entrada e saída a serem analisados em cada cenário. Tal abordagem permite a simulação do comportamento da agronindústria frente a preços conhecidos.

### 5.1 Premissas adotadas e dados de entrada e saída do modelo

No primeiro estudo de caso foram utilizados dados extraídos da literatura para os principais parâmetros e valores de entrada da modelagem. Para tanto, a primeira planta foi considerada fictícia e a partir desta outros contextos foram explorados. O segundo cenário evolui esta proposta, casando os dados já consolidados com as capacidades do Complexo Agroindustrial Ferrari, bem como utiliza novos valores para os parâmetros verificados junto à unidade fabril. O terceiro estudo aborda o lucro do empreendimento em função da variação dos preços das *commodities*, considerando a venda da eletricidade excedente no ACR.

Para a elaboração dos três cenários, as seguintes hipóteses foram levantadas:

- A produção da usina se dá nos períodos de safra e entre-safra. Todavia, esta abordagem supõe apenas o período de safra, o chamado ano agrícola. No caso específico da cogeração, as turbinas de extração-condensação permitem explorar o potencial do despacho de eletricidade em períodos cuja oferta de matéria-prima seja menos favorável.
- Seabra (2008) considera a safra durante o período de 200 dias compreendido entre os meses de abril e novembro, no sudeste brasileiro. Além de seguir esta recomendação do autor, o ciclo produtivo será estimado em 20 horas diárias.
- Os custos de produção contabilizados na função objetivo tratam apenas da etapa industrial. As despesas com a matéria-prima não foram consideradas. Neste sentido, Seabra (2008) argumenta que independente da abordagem, a cana, de fato, representa uma enorme parcela dos custos.
- Embora o *mix* não seja obtido diretamente pelo modelo, o mesmo pode ser expresso em função das quantidades de recursos alocados para produzir as *commodities* açúcar e etanol. Seu valor é a razão entre o volume total de caldo processado pela usina e a quantidade destinada para produção tanto de açúcar quanto de etanol.

Os principais parâmetros e variáveis de entrada são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2:

Tabela 5.1: Parâmetros do modelo

Parâmetro	Referência
$M_{moa}$	Grisi (2010)
$ECR_{i,j}$ e $TCR_{i,j}$	Grisi (2010)
$E_{moa}$ , $E_{rec}$ e $E_{aux}$	Grisi (2010)
$\eta RC_{ji}$ e $\eta RE_{jh}$	Grisi (2010)

Tabela 5.2: Variáveis de entrada do modelo

Variável de entrada	Referência
$X_{cana}$	Seabra (2008)
$PC_i$	CEPEA (2016a) e CEPEA (2016b)
$PE$	CCEE (2014)
$XR_j$	Lazzaretto et al. (2012)
$CCR_{ij}$ e $CER_{hj}$	Grisi (2010)
$DC_i$	-
$DE_h$	-

## 5.2 Dados da literatura e preços atuais de mercado

Neste primeiro estudo de caso, são explorados os dados da literatura referentes à produção sucroenergética numa planta típica durante a temporada de colheita da matéria-prima. Para tanto, são adotados os valores médios e parâmetros presentes na literatura, conforme pôde ser visto na Tabela 5.1. O Anexo C apresenta os números praticados neste cenário. Os preços de eletricidade foram computados a partir da média dos valores contratados no 20º LEN, destinado ao ACR.

Embora os autores expressem alguns dos parâmetros referenciados em moeda estrangeira, no caso o dólar americano, os números foram atualizados para moeda nacional afim de serem corrigidos pela inflação vigente, conforme o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA). A fórmula para tal conversão, verificada a partir das definições da relação entre moeda e inflação discutidas por Blanchard (1999), pode ser vista na Equação 5.1 a seguir:

$$Preco_{real} = \frac{IPCA_{base}}{IPCA_t} \cdot Preco_t \quad (5.1)$$

Onde:

$Preco_{real}$	Preço atualizado na moeda corrente
$Preco_t$	Preço nominal do produto à época de sua aquisição, ano $t$
$IPCA_{base}$	Valor do IPCA no período vigente
$IPCA_t$	Valor do IPCA à época de aquisição do bem, ano $t$

Os resultados obtidos com a simulação, ilustrados na Tabela 5.3, contêm a solução ótima para os dados de entrada propostos.

Tabela 5.3: Dados de saída do modelo obtidos para o primeiro cenário

Variável de saída	Unidade
Lucro do empreendimento	197.859.400 R\$
Quantidade de <i>commodity</i> açúcar VHP produzida	364.160 ton
Quantidade de <i>commodity</i> etanol anidro produzida	25.120 m <sup>3</sup>
Quantidade de <i>commodity</i> etanol hidratado produzida	- m <sup>3</sup>
Quantidade de <i>commodity</i> eletricidade produzida	384.560 MWh
<i>Mix</i> de Produção (açúcar/álcool)	% 100/0

Através dos *outputs* é possível visualizar que o *mix* de produção assumiu a razão (100:0), patamar inatingível nas usinas com produção agregada de açúcar e álcool. Usualmente estas unidades precisam atender demandas mínimas de produção, seja para cumprir contratos de comercialização, ou então para reduzir a capacidade ociosa do empreendimento. Entretanto, o *solver* faz a alocação de todo o insumo para a produção de açúcar por conta da valorização deste em relação ao etanol. Verifica-se que para esta primeira abordagem as restrições de demanda foram relaxadas.

Embora o *mix* apresente um valor impraticável, a produção de 25.120 m<sup>3</sup> de etanol anidro evidencia a sinergia existente nas plantas de produção conjunta. Todo este montante de combustível pode ser explicado por conta dos volumes de melaço gerados na produção açucareira e direcionados para rota de produção do etanol. Todavia, o *software* Lingo contabilizou toda a produção de álcool para a rota do etanol anidro por conta de sua precificação ser superior à do hidratado.

A ocorrência de valores extremos no *blend*, a exemplo da razão 100/0 presente na Tabela 5.3, pode ser explicada pela relaxação necessária das demandas mínimas de *commodity* a serem cumpridas neste estudo de caso. Sem esta modificação, a solução apontada pelo *solver* seria infactível. Grisi et al. (2011) em seu modelo encontram situação semelhante ao realizar análise de sensibilidade para diferentes cenários da produção conjunta entre açúcar e álcool na Usina Vale do Rosário. Ao efetuar um incremento de

30 % no preço do etanol para a composição de hipóteses otimistas em relação a este derivado, os autores encontram como resultado a produção nula de açúcar. Ao promover o mesmo choque, é possível vislumbrar tal situação no modelo proposto e observar decréscimo de 21 % na produção de eletricidade excedente, além de um incremento de 58 % na receita do empreendimento por conta da valorização do álcool.

Uma segunda simulação com os dados da literatura foi realizada, porém com os valores de custo das *commodities* açúcar VHP, etanol anidro e hidratado, expressos pela matriz  $CCR_{ij}$ , obtidos através da referência PECEGE (2012), conforme Tabela 5.4. Ao simular o modelo proposto neste novo contexto, prevaleceu a produção alcooleira, com *mix* totalmente destinado à fabricação de etanol hidratado.

Tabela 5.4: Valor do custo, em R\$/ton ou m<sup>3</sup> das *commodities* em função do tipo de recurso

Variável	Valor
Custo açúcar VHP - caldo ( $CCR_{1,3}$ )	235,28
Custo AEAC - caldo ( $CCR_{2,3}$ )	354,80
Custo AEHC - caldo ( $CCR_{3,3}$ )	330,57

Observam-se nas duas simulações oscilações significativas do *blend* para os valores extremos. Uma das explicações deste efeito é a definição do valor zero pelo *solver*. O *software* Lingo considera como nulo valores abaixo de  $10^{-6}$ . Números decimais acima deste, mesmo que pequenos, já são contabilizados como quantidades. Uma maneira de mitigar este efeito seria a adoção de Programação Linear Inteira. Entretanto, tal solução aumentaria consideravelmente a dificuldade do problema.

### 5.3 Dados do complexo Agroindustrial Ferrari

O segundo estudo de caso é uma extensão da primeira abordagem. Para a composição deste, foram adotados os dados presente no endereço eletrônico da Usina Ferrari juntamente com os dados da literatura utilizados anteriormente. A Tabela 5.5 apresenta um resumo com as variáveis que sofreram alterações em relação às Tabelas 5.1 e 5.2, além dos seus respectivos valores.

Ao simular o modelo proposto, o resultado inicial mostrou-se infactível. Ao relaxar as restrições de demanda, uma a uma em relação à variável  $DC_i$  (demanda da *commodity*  $i$ ), percebeu-se que os limitantes da melhor solução eram os volumes de etanol. Ao computar a demanda mínima de açúcar no modelo relaxado, gerou-se um *mix* totalmente favorável a este derivado. Novas compilações do algoritmo foram realizadas, de maneira que observou-se o valor máximo de 29,3 m<sup>3</sup> de produção alcooleira para que a

Tabela 5.5: Dados de entrada do modelo obtidos para o segundo cenário

Variável	Valor Assumido	Unidade	Variação
$X_{cana}$	750	ton/h	25 %
$DC_1$ , demanda açucareira	57,5	ton	-
$DC_2, DC_3$ , demanda álcooleira	65	m <sup>3</sup>	-
$XEE$ , eletricidade excedente	73,5	MWh	-

Fonte: (USINA FERRARI, 2016)

solução do problema continuasse ótima e fosse simultânea.

Para balancear a produção da usina, foi criada uma nova restrição, conforme pode ser visto na Equação 5.2, de maneira a quantificar as demandas pelas *commodities* etanol anidro e hidratado. Forçando esta restrição ao seu valor limitante, é possível verificar a produção conjunta de açúcar e etanol, já que o modelo proposto passa a ser obrigado a cumprir uma demanda contratada. A soma entre as variáveis  $DC_2$  e  $DC_3$  dá autonomia ao *solver* para alocar a produção etílica entre os tipos de álcoois comercializados.

$$DC_2 + DC_3 \geq 23,9 \quad (5.2)$$

A Tabela 5.6 apresenta os resultados da simulação.

Tabela 5.6: Dados de saída do modelo obtidos para o segundo cenário

Variável de saída	Unidade
Lucro do empreendimento	16.446 Milhões de R\$
Quantidade de <i>commodity</i> açúcar VHP produzida	230.520 ton
Quantidade de <i>commodity</i> etanol anidro produzida	25.120 m <sup>3</sup>
Quantidade de <i>commodity</i> etanol hidratado produzida	70.480 m <sup>3</sup>
Quantidade de <i>commodity</i> eletricidade produzida	294.000 MWh
<i>Mix</i> de Produção (açúcar/álcool)	% 63/37

Na solução apresentada, o caldo é destinado às produções de açúcar VHP e etanol hidratado nas proporções definidas pelo *mix*. Contudo, é possível visualizar, através do relatório gerado pelo *software* Lingo, que toda a produção de álcool anidro é originada do melaço, evidenciando o aproveitamento de subprodutos da fabricação de açúcar para a obtenção de álcool.

## 5.4 Análise de sensibilidade variando alternativamente os preços das *commodities*

Este terceiro estudo é uma evolução do primeiro e segundo caso. Partindo-se inicialmente dos dados da usina, os preços das *commodities* sofreram variações percentuais alternativamente. Como objetivo para esta abordagem, espera-se avaliar o comportamento da produção sucroenergética a partir da composição de cenários distintos de produção.

Foram avaliados 6 cenários, tendo como base a variação dos preços do açúcar VHP, etanol anidro e hidratado verificados nas séries históricas de preços em CEPEA (2016a) e CEPEA (2016b).

A Tabela 5.7 apresenta os dados entrada dos preços adotados, além dos valores de saída para as simulações propostas.

Tabela 5.7: Dados de entrada e valores de saída obtidos para o terceiro estudo de caso

Preço das <i>commodities</i>				Solução ótima					
VHP	AEAC	AEHC	Elet. Ex.	Lucro	VHP	AEAC	AEHC	Elet. Ex.	<i>mix</i>
(R\$/ton)	(R\$/m <sup>3</sup> )	(R\$/m <sup>3</sup> )	(R\$/MWh)	(R\$×10 <sup>6</sup> )	(ton)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(MWh)	(%)
1.293,56	1.801,00	1.670,00	238,33	164.461	230.520	25.120	89.120	294.000	63/37
1.367,97	1.801,00	1.670,00	238,33	181.612	258.160	25.120	89.120	294.000	71/29
1.293,56	1.801,00	2.233,36	238,33	215.944	230.520	25.120	70.440	294.000	63/37
1.293,56	1.801,00	9.38,84	238,33	164.041	230.520	0	114.240	294.000	63/37
1.293,56	1.086,10	938,84	238,33	95.697	258.160	114.240	0	294.000	71/29
1.000,00	1.000,00	1.000,00	238,33	30.215	230.520	95.600	95.600	294.000	68/32

Os resultados apontam para uma produção predominantemente açucareira. Embora tenham sido simulados preços atrativos tanto da produção de etanol anidro quanto hidratado, a restrição para o atendimento à necessidade de açúcar delimitou as opções de escolha entre o *mix*. Ao relaxar tal restrição (Equação 4.2 com valor de  $i$  igual a 1), observaram-se valores de *blend* na proporção 100:0, situação visualizada no primeiro estudo de caso. Também é possível notar que os volumes de energia excedente, outra *commodity* analisada, não sofreram alterações. Este fato pode ser explicado por conta do atingimento da capacidade técnica dos geradores e da queima integral do bagaço e da palha nas caldeiras, suprimindo todas as demandas energéticas da planta sucroenergética.

Os maiores lucros na etapa industrial foram aqueles aferidos quando o preço do etanol anidro se mostrou superior aos preços vigentes. Esta hipótese pode ser melhor contextualizada ao se observar os casos em que toda a produção alcooleira, provinda do caldo da cana, foi direcionada para o etanol anidro. Grisi et al. (2011) observa que qualquer que seja o aumento do preço do etanol, obtém-se um aumento proporcional do



preço considerado para o açúcar.

Afim de verificar o efeito do preço de venda eletricidade na composição do *mix*, foram realizadas outras quatro simulações do modelo proposto, em consonância com o segundo cenário deste terceiro e último estudo de caso. Nesta nova composição de cenários, a primeira simulação consiste no uso dos preços atuais de venda de eletricidade no mercado de curto prazo ( $PE_{arual}$ ), enquanto a segunda e a terceira abordam os valores máximo ( $PE_{max}$ ) e mínimo ( $PE_{min}$ ) encontrados no decênio 2007-2016 para este mesmo tipo de comercialização. A quarta e última simulação utiliza o valor mediano ( $PE_{med}$ ) do intervalo de análise. A Tabela 5.8 apresenta os valores de PLD praticados e o percentual destes em relação ao ACR.

Tabela 5.8: Dados de entrada e saída do modelo obtidos para o terceiro cenário considerando o PLD

Variável	Valor Assumido	Unidade	<i>Mix</i>
$PE_{atual}$	199,48	R\$/MWh	63/37 %
$PE_{max}$	822,83	R\$/MWh	63/37 %
$PE_{mediano}$	110,51	R\$/MWh	71/29 %
$PE_{min}$	12,08	R\$/MWh	71/29 %

Fonte: (CCEE, 2016)

O *software* Lingo decidiu, a partir dos preços propostos acima, alocar mais da metade do caldo produzido para o fluxo açucareiro. Percebe-se que ao incrementar os preços de venda da eletricidade excedente, a usina aproxima-se do perfil de produção alcooleiro. Isto pode ser verificado na matriz que relaciona o consumo de eletricidade para fabricação das *commodities*, presente em Grisi (2010), cujo consumo é maior para o açúcar, porém compensado por uma menor demanda de vapor. A produção açucareira necessita de maior quantidade de eletricidade para acionamento dos motores na etapa de extração da sacarose. Já a produção de álcool é energo-intensiva em vapor nas etapas de fermentação e destilação.

Quando o preço da eletricidade excedente passa a ser atrativo, o modelo aponta maior vantagem na produção de álcool, justificado pelo gasto interno de energia usina ser reduzido se comparado ao açúcar. Embora o açúcar consuma menos vapor, parte do montante de energia térmica disponível acaba sendo direcionado à produção álcooleira, agora a partir do melão.

## 6 Conclusões e trabalhos futuros

Este capítulo tem por objetivos apresentar um breve resumo de todo o conteúdo discutido nas seções anteriores, evidenciar as conclusões finais desta investigação e listar as observações relacionadas a este trabalho. São apontadas possíveis sugestões de trabalhos futuros.

### 6.1 Resumo e conclusões

Este trabalho sugere um modelo de otimização aplicado ao balanço econômico da cogeração de energia, produção de álcool e açúcar na indústria canaveira. O objetivo desta abordagem é a alocação ótima de recursos, através da teoria de PO, na etapa industrial do processamento da cana-de-açúcar. O modelo proposto quantifica o volume de derivados a serem produzidos em função dos preços de comercialização das principais *commodities* do setor. Para tanto, são consideradas restrições de demanda para cada produto, além de restrições associadas às demandas energéticas da planta agroindustrial.

O primeiro capítulo traz uma introdução do setor sucroalcooleiro brasileiro, contextualizando a atividade canavieira desde sua introdução no país até consolidação da cana vetor energético. Ilustra a participação da biomassa residual nas matrizes energética e elétrica, evidenciando a importância das fontes renováveis na mitigação de gases do efeito estufa. Ao final, traz uma revisão literária, destacando os principais métodos e abordagens utilizados no planejamento da produção sucroalcooleira.

Na sequência, capítulo dois, a biomassa é caracterizada como principal insumo desta indústria. São descritas as etapas fundamentais do processamento da matéria-prima, desde sua recepção, na porta das usinas, até a obtenção dos derivados. Conceitua e discorre sobre a comercialização das *commodities*, abordando as relações entre oferta e demanda nos mercados mais relevantes. Ilustra o comportamento das séries históricas de preços para o decênio 2007-2016.

O terceiro capítulo introduz a PO, elucidando as etapas de elaboração de um modelo matemático de otimização. A PL é detalhada e na sequência são demonstrados dois exemplos de problemas conhecidos na teoria. Dois dos principais métodos empregados na resolução de problemas de otimização são discutidos. São descritos os principais *solvers* disponíveis, evidenciando-se a plataforma Lingo.

No quarto capítulo, é descrita a metodologia empregada para a solução da alocação de recursos no contexto da produção industrial canavieira. A Usina Ferrari é caracterizada como objeto de estudo em função de sua capacidade de produção de álcool e açúcar, geração de energia e matéria-prima processada durante o ano agrícola. O modelo matemático, composto pela função objetivo e quatro grupos de restrições, é apresentado.

No quinto capítulo, três estudos de caso são desenvolvidos e seus resultados são analisados. O primeiro utiliza dados extraídos da literatura e preços atuais de mercado. No segundo estudo, o modelo é alimentado com dados do complexo Ferrari em conjunto com as informações obtidas nas referências. Trata-se de uma evolução da primeira abordagem, acrescida pelas demandas energéticas e de *commodities* declaradas pela unidade fabril. No terceiro, faz-se uma análise de sensibilidade variando alternativamente os preços das *commodities*.

Dos resultados verificados nos estudos de caso do despacho sucroenergético, podem-se elencar as seguintes conclusões:

- A ocorrência de valores extremos no *mix* de produção demonstrou a necessidade de um estudo aprofundado das restrições de demanda de produção, expressas pelas necessidades de cumprimento dos contratos de comercialização. A relaxação destas faz o *solver* alocar os insumos integralmente para a produção daquele derivado cujo preço esteja mais valorizados e tenha seus custos menores, em relação às outras *commodities*. Outro fator que contribui para este efeito, é a definição de valor nulo no otimizador. Valores a partir de  $10^{-6}$  já são considerados diferentes de zero, fazendo com que o resultado final, na prática, assuma valor nulo. Uma maneira de mitigar este efeito seria a adoção de Programação Inteira, o que aumentaria consideravelmente a complexidade do problema.
- É possível, através da modelagem, verificar produção de volumes de álcool mesmo quando todo caldo, insumo comum aos dois derivados, é direcionado à rota açucareira. Tal fato, presente no primeiro estudo de caso, evidência a sinergia existente na produção de açúcar e álcool nas plantas de produção conjunta.
- Por meio da relaxação das restrições existentes e inserção de novas equações nos estudos de caso 2 e 3, foi possível sensibilizar o modelo até verificar um valor máximo de produção alcooleira de maneira que a solução continuasse ótima. O aumento do número de restrições, principalmente aquelas associadas ao atendimento de demanda pelas *commodities* diminui o poder de decisão da *solver*.
- No terceiro estudo de caso, foi possível verificar maiores lucros na etapa industrial quando os preços do etanol, em especial o anidro, foram incrementados. Isto pode ser explicado por conta da valorização desta *commodity* e sua representatividade como vetor energético. O etanol anidro é destinado à mistura com a gasolina, enquanto o hidratado compete com o combustível fóssil, substituindo-o quando a diferença entre os preços mostra-se vantajosa.

- Ao impulsionar os preços de venda da eletricidade excedente, o *mix* aproximou-se da produção etílica. A produção açucareira além de consumir mais eletricidade, direciona parte do vapor de processo para a produção de álcool a partir do melaço, diminuindo a parcela de vapor disponível para a cogeração.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros são listados cinco itens. O primeiro refere-se à alimentação do modelo, enquanto os outros exploram dificuldades encontradas e aspectos adicionais do problema. Em específico, os dois últimos itens propõem a elaboração de *mix* específicos a fim de quantificar produtos e sub-produtos que concorrem pelo mesmo tipo de insumo.

- O modelo deve ser melhor explorado com a resolução de uma quantidade maior de cenários e validação dos mesmos. Sugere-se a valoração probabilística dos preços das *commodities*. Para tanto, deve ser feita a escolha da distribuição de probabilidade mais apropriada para as variáveis de entrada do modelo de otimização proposto. Aconselha-se o estudo das distribuições afim de avaliar o impacto de cada uma na definição das variáveis aleatórias, bem como sua implementação computacional.
- Para a melhor adequação do modelo em relação ao objeto de estudo, recomenda-se a investigação do histórico de comercialização da usina. É desejável a obtenção dos dados operacionais e custos praticados na agroindústria, sobretudo as matrizes de conversão recurso-commodity e recurso-energia.
- O modelo proposto aproxima-se de uma modelagem insumo-produto. Para maior descrição de cada processo industrial de obtenção dos derivados, se faz necessário um estudo mais detalhado dos fluxos energéticos da planta, bem como o balanço mássico.
- Explorar a produção dos diferentes tipos de açúcares e álcoois, desagregando as variáveis que representam estas *commodities* em vários níveis. Recomenda-se a quantificação do *mix* de produção entre o etanol anidro e o hidratado. Analogamente, também sugere-se a quantificação dos tipos de sacarose e subprodutos com valor comercial, como é o caso da levedura seca.
- Quantificação da queima dos subprodutos energéticos da cana. Embora a palha e o bagaço sejam resíduos destinados para a combustão conjunta nas caldeiras, ambos possuem características caloríficas distintas. Verificar qual atribuição destes resíduos para a queima, permite planejar a gestão deste recurso desde o campo

até a indústria, em particular a palha. Períodos de escassez de matéria-prima em conjunto com contextos hidrológicos desfavoráveis, influenciam a oferta de biomassa no mercado. A comercialização destes insumos pode se tornar oportunidade para as usinas.

## Referências

ANEEL. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. [S.l.], 2015. Acesso em: 17/07/2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa%282%29.pdf>>.

BACCARIN, J. G. *A constituição da nova regulamentação sucroalcooleira*. [S.l.]: UNESP, 2005.

BASSETO, N. Z. *SEPPA - Sistema especialista para planta de produção de álcool*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2006.

BLANCHARD, O. *Macroeconomia: teoria e política econômica*. [S.l.]: Campus, 1999.

BUDDADEE, B.; WIROJANAGUD, W.; WATTS, D. J.; PITAKASO, R. The development of multi-objective optimization model for excess bagasse utilization: A case study for Thailand. *Environmental Impact Assessment Review*, p. 380–391, 2008.

CARVALHO, M. D. *Proposta de um modelo de planejamento agregado numa usina de açúcar e álcool vinculado à flutuação de preços em mercados à vista e no mercado futuro*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2009.

CCEE. *Leiles. Resultados. 20º Leilão de Energia Nova*. 2014. Disponível em: <[http://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE\\_340023](http://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_340023)>.

CCEE. *Preços de liquidação das diferenças. Preços em formato CSV*. 2016. Disponível em: <[http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/como\\_ccee\\_atua/precos/precos\\_csv?\\_afLoop=748197600559759#%40%3F\\_afLoop%3D748197600559759%26\\_adf.ctrl-state%3D7ye80hz41\\_114](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_csv?_afLoop=748197600559759#%40%3F_afLoop%3D748197600559759%26_adf.ctrl-state%3D7ye80hz41_114)>.

CEPEA. *Indicador Mensal do açúcar VHP CEPEA/ESALQ São Paulo - Mercado Externo*. 2016. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/acucar-sao-paulo-mercado-externo.aspx>>.

CEPEA. *Índice Semanal do Etanol Hidratado Combustível e Indicador Semanal do Etanol Anidro - CEPEA/ESALQ*. 2016. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/etanol.aspx>>.

CORTEZ, L. A. B. *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade*. [S.l.]: Blucher, 2010. Vários Autores.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. *Biomassa para energia*. [S.l.]: Editora da Unicamp, 2008.

DANTAS, D. N. *Uso da biomassa da cana-de-açúcar para a geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2010.

DANTAS FILHO, P. L. *Análise de custos na geração de energia com o bagaço da cana-de-açúcar: um estudo de quatro usinas de São Paulo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2009.

DANTAS, G. A.; LEGEY, L. F. L.; MAZZONE, A. Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 21, p. 356–364, May 2013.

DUTRA, A. *Método de Pontos Interiores Aplicado a um problema de sequenciamento job-shop*. Dissertação (Mestrado), 2004.

ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; LOZANO, M. A.; SERRA, L. M. Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy Conversion and Management*, v. 48, p. 2978–2987, 2007.

EPE, E. d. P. E. *Balanço Energético Nacional BEN 2015, ano base 2014*. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf)>.

FURLAN, F. F.; COSTA, C. B. B.; FONSECA, G. C.; SOARES, R. P.; SECCHI, A. R.; CRUZ, A. J. G.; GIORDANO, R. C. Assessing the production of first and second generation bioethanol from sugarcane through the integration of global optimization and process detailed modeling. *Computers & Chemical Engineering*, v. 43, p. 1–9, August 2012.

GARFINKEL, R. S.; NEMHAUSER, G. L. *Integer programming*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1972.

GRISI, E. F. *Gestión óptima de la operación de industrias sucroenergéticas en mercados eléctricos*. Tese (Doutorado), 2010.

GRISI, E. F.; YUSTA, J. M.; KHODR, H. M. A short-term scheduling for the optimal operation of biorefineries. *Energy Conversion and Management*, v. 52, n. 1, p. 447–456, January 2011.

HECKLER, J. C. *Palha: fundamento do Sistema Plantio Direto*. 2002. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/38756/1/COL20027.pdf>>.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introdução à pesquisa operacional*. 9. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2013. v. 1. 1005 p.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. A. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. *Biomass and Bioenergy*, v. 46, p. 564–573, November 2012.

ILLUKPITIYA, P.; YANAGIDA, J. F.; OGOSHI, R.; UEHARA, G. Sugar-ethanol-electricity co-generation in Hawai'i: An application of linear programming (LP) for optimizing strategies. *Biomass and Bioenergy*, v. 48, p. 203–212, January 2013.

KOSTIN, A. M.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G.; MELE, F. D.; BAGAJEWICZ, M. J.; JIMÉNEZ, L. Design and planning of infrastructures for bioethanol and sugar production under demand uncertainty. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 90, p. 359–376, 2012.

LAMONICA, H. M. Produção de vapor e eletricidade a evolução do setor sucroalcooleiro. In: CTC - CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. *II GERA: Workshop de gestão de energia e resíduos na agroindústria sucroalcooleira*. [S.l.]: CTC, 2007. p. 37. II GERA: Workshop de gestão de energia e resíduos na agroindústria sucroalcooleira FZEA - USP.

LAMOUNIER, W. M.; FILHO, M. F. C.; BRESSAN, A. A. Análise do *trade-off* na produção de açúcar e álcool nas usinas da região Centro-Sul do Brasil. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL. Fortaleza, Brasil: XLIV CONGRESSO DA SOBER, 2006. p. 21. Comercialização, Mercados e Preços Agrícolas.

LAZZARETTO, A.; MORANDIN, M.; TOFFOLO, A. Methodological aspects in synthesis of combined sugar and ethanol production plant. *Energy*, v. 41, n. 1, p. 165–174, May 2012.

LORA, E. E. S. Tecnologia e aplicação racional da energia elétrica e de fontes renováveis na agricultura. In: . Campina Grande: [s.n.], 2001. v. 1, p. 58–91.

LUENBERGER, D. G. *Linear and nonlinear programming*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers Group, 2004.

MEDELLIN, V. A. C. *Valoração probabilística de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de bagaço de cana-de-açúcar em leilão de energia de reserva*. Dissertação (Mestrado), 2015.

MORAES, M. A. F. D.; SHIKIDA, P. F. A. *Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios*. São Paulo: Atlas, 2002.

MORANDIN, M.; TOFFOLO, A.; LAZZARETTO, A.; MARÉCHAL, F.; ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A. Synthesis and parameter optimization of a combined sugar and ethanol production process integrated with a CHP system. *Energy*, v. 36, n. 6, p. 3675–3690, June 2011.

PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R. Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. *Gestão de Produção*, v. 14, n. 1, p. 25–41, janeiro - abril 2007.

PASSOS, A. N. *Estudos em programação linear*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2009.

PECEGE. *Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, e etanol no Brasil: Acompanhamento da safra 2011/2012*. 2012.

RANGEL, A. L. *Avaliação de Software para a elaboração Automática da Escala de Trabalho em Enfermagem*. Tese (Doutorado), 2010.

RARDIN, R. L. *Optimization in operation research*. [S.l.]: Pretience Hall, 2000.



ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. *Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira*. [S.l.]: Editora da Unicamp, 2005.

SCARAMUCCI, J. A.; PERIN, C.; PULINO, P.; BORDONI, O. F. J. G.; CUNHA, M.; CORTEZ, L. A. B. Energy from sugarcane bagasse under electricity rationing in Brazil: a computable general equilibrium model. *Energy Policy*, p. 986–992, 2006.

SEABRA, J. E. A. *Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2008.

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. *Energy Policy*, v. 39, p. 421–428, January 2011.

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S.; MONTEVECHI, J. A. B. Multi-choice mixed integer goal programming optimization for real problems in a sugar and ethanol milling company. *Applied Mathematical Modelling*, v. 37, n. 9, p. 6146–6162, May 2013.

SILVA, E. B. *Leilões combinatórios centralizado e descentralizado: uma análise para o setor elétrico brasileiro*. Tese (Doutorado), 2015.

TOLMASQUIM, M. T. *Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil*. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2004.

USINA FERRARI. *Usina Ferrarri. Produtos*. 2016. Disponível em: <<http://www.usinaferrari.com.br/produtos>>.

WALTER, A. C. S. *Viabilidade e perspectivas da cogeração e da geração termoelétrica junto ao setor sucroalcooleiro*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 1994.

WALTER, A. C. S.; BAJAY, S. V. Perspectivas da venda de energia Elétrica excedente no setor sucroalcooleiro. n. 2, 1992. Disponível em: <<http://www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=42>>.

WOLSEY, L. A. *Integer programming*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998.

YAMAKAMI, A. *Método de Pontos Interiores em Programação Linear*. 2016. Disponível em: <<http://www.dt.fee.unicamp.br/~akebo/ia881/pi1.pdf>>.



# ANEXO A - Código em Lingo

```

MODEL:

SETS:

COMMODITY /@FILE('Projeto4PROD_A.txt')/:
XC,      !Quantidade a ser produzida de cada commodity i (Xi);
PC,      !Preço da commodity i (Pi);
DC;      !Montante de commodity;

RECURSO /@FILE('Projeto4PROD_A.txt')/:
XR;      !Quantidade de cada recurso j (Xj);

ENERGIA /@FILE('Projeto4PROD_A.txt')/:
DE;      !Montante de energia produzido por tipo h (MWh);

LINK1(COMMODITY, RECURSO):
XCR,      !Quantidade da commodity i do recurso j (Xij);
CCR,      !Parâmetro custo de recursos de produção da commodity i a
!partir do recurso j (Cij);
ECR,      !Demanda de energia elétrica para produzir a commodity i a
!partir do recurso j;
TCR;      !Demanda de vapor para produção de cada commodity i a partir
!do recurso j;

LINK2(RECURSO, COMMODITY):
XRC,      !Quantidade do recurso j para produzir a commodity i (Xji);
nRC;      !Eficiência de processo na transformação do recurso j na
!commodity i (Nji);

LINK3(ENERGIA, RECURSO):
XER,      !Quantidade do recurso j para produzir a energia h - nesse
!caso j varia de 1 a 2;
CER;      !Parâmetro custo da energia h gerada a partir do recurso j;

LINK4(RECURSO, ENERGIA):
nRE,      !Eficiência de processo na transformação do recurso j para
!energia h (Njh);
XRE;      !Quantidade de recurso j necessária para produzir a energia
!h;

ENDSETS

```

DATA:

```

!QUANTIDADE DE RECURSO j DISPONÍVEL;
XCANA = 750;                !quantidade de cana-de-acucar disponivel;
XR = @FILE('Projeto4PROD_A.txt');  !quantidade de recurso;

!PREÇOS DAS COMMODITIES;
PC = @FILE('Projeto4PROD_A.txt');  !preço de cada commodity;
PE = 238.33;
!PE = ?; !preço da eletricidade exportada;

!EFICIÊNCIAS DE TRANSFORMAÇÃO RECURSO-COMMODITY;
nRC = @FILE('Projeto4PROD_A.txt');  !eficiencia recurso-commodity;

!EFICIÊNCIAS DE TRANSFORMAÇÃO RECURSO-ENERGIA;
nRE = @FILE('Projeto4PROD_A.txt');  !recurso-energia;

!CUSTO DE PRODUÇÃO COMMODITY-RECURSO;
CCR = @FILE('Projeto4PROD_A.txt');  !custo commodity-recurso;

!CUSTO DE PRODUÇÃO ENERGIA-COMMODITY;
CER = @FILE('Projeto4PROD_A.txt');  !custo energia-recurso;

!CONSUMO DE ENERGIA POR ESTAGIO;
!ENERGIA MECANICA;
MOA = 0.011; !Moagem;

!ENERGIA TERMICA;
TCR = @FILE('Projeto4PROD_A.txt');  !Energia Termica conversao commodity-
recurso;

!ENERGIA ELÉTRICA;
EREC = 0.007;                !Recepção;
EMOA = 0.011;                !Moagem;
ECR = @FILE('Projeto4PROD_A.txt');  !Energia Elétrica conversao commodity-
!recurso;
EAUX = 0.3;                  !Demanda auxiliar de energia;

```

ENDDATA

```

!FUNÇÃO OBJETIVO;
[LUCRO] MAX = (@SUM(COMMODITY(i):
              (PC(i)*XC(i)) + (PE*XEE) - (@SUM(LINK1(i,j):
              CCR(i,j)*XCR(i,j)) + @SUM(LINK3(h,j): CER(h,j)*XER(h,j)))
);

!RESTRIÇÕES;
!Atendimento a demanda (i);
@FOR(COMMODITY(i):
    [DEMANDT] @SUM(LINK1(i,j): XCR(i,j)) >= DC(i);
);

!Atendimento a demanda (h);
@FOR(ENERGIA(h):
    [DEMENERG] @SUM(LINK3(h,j): XER(h,j)) >= DE(h);
);

!Atendimento a demanda de energia termica;
[DETERM] DE(1) = @SUM(LINK1(i,j): TCR(i,j) * XCR(i,j));

!Atendimento a demanda de energia mecania;
[DEMEC] DE(2) = MOA * XCANA;

!Atendimento a demanda de energia eletrica;
[DEELET] DE(3) = @SUM(LINK1(i,j): (ECR(i,j) * XCR(i,j))) +
              (EREC + EMOA) * XCANA + EAUX;

!RELAÇÕES;
!Conversao recurso-commodity;
@FOR(LINK1(i,j):
    [RECCOMMDT] XCR(i,j) = XRC(j,i) * nRC(j,i)
);
!Conversao recurso-energia;
@FOR(LINK3(h,j):
    [RECENERG] XER(h,j) = XRE(j,h) * nRE(j,h)
);

!Producao total de commodity;
@FOR(COMMODITY(i):
    [PRODCOMMDT] XC(i) = @SUM(LINK1(i,j): XCR(i,j))
);

!Eletricidade Excedente;
[ELETCOMMDT] XEE = @SUM(LINK3(h,j): XER(h,j) - DE(3));

!Limite de recursos (j);
@FOR(RECURSO(j):
    [LIMTREC] @SUM(LINK2(j,i): XRC(j,i)) +
              @SUM(LINK4(j,h): XRE(j,h)) = XR(j)*XCANA
);

!@BND(inferior,variável,superior) ;
@BND(3.25,XEE,73.5);

[DVHP] XC(1) >= 57.5;
[DAETA] DC(2) + DC(3) >= 23.9;
END

```

# ANEXO B - Projeto.txt

```

Projeto4PROD_A

!Nome das commodities;
VH AA AH~

!Nome dos recursos;
P B C M~

!Nome dos tipos de energia;
TER MEC ELT~

!Quantidade de recurso disponivel;
0.14 0.28 0.72 0.017~

!Preco das commodities;
1293.56 1801 1670~

!Eficiencias de transformacao recurso-commodity;
0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000
0.16860 0.11200 0.11200
0.00000 0.49290 0.49290~

!Eficiencias de transformacao recurso-energia;
4.1468 3.0367 3.6444
2.2492 1.7863 2.4392
0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 0.0000~

!Custo de producao commodity-recurso;
0.00 0.00 1017.50 0.00
0.00 0.00 1506.57 316.61
0.00 0.00 1369.61 287.83~

!Custo de producao energia-recurso;
27.06 27.06 0.00 0.00
54.11 0.00 0.00 0.00
38.46 10.26 0.00 0.00~

!Consumo de vapor;
0.00 0.00 2.94 0.00
0.00 0.00 3.55 2.84
0.00 0.00 3.55 2.84~

!Consumo de eletricidade;
0.000 0.000 0.045 0.000
0.000 0.000 0.018 0.011
0.000 0.000 0.018 0.011~

```

## ANEXO C - Primeiro cenário

Tabela 0.1: Dados de entrada do modelo obtidos para o primeiro cenário

Variável	Valor Assumido	Unidade
$X_{cana}$	1.000	ton/h
$PC_1$ , açúcar VHP	1.293,56	R\$/ton
$PC_2$ , etanol anidro	1.801,00	R\$/m <sup>3</sup>
$PC_3$ , etanol hidratado	1.670,00	R\$/m <sup>3</sup>
$PE$ , eletricidade	236,87	R\$/MWh
$XR_1$ , palha disponível	0,14	ton/ton
$XR_2$ , bagaço disponível	0,28	ton/ton
$XR_3$ , caldo disponível	0,72	ton/ton
$XR_4$ , melaço disponível	0,017	ton/ton <sub>caldo</sub>
$CCR_{1,3}$ , custo açúcar VHP-caldo	1017,50	R\$/ton
$CCR_{2,3}, CCR_{3,3}$ , custo etanol anidro e hidratado-caldo	1369,61	R\$/m <sup>3</sup>
$CCR_{2,4}, CCR_{3,4}$ , custo etanol anidro e hidratado-caldo	287,83	R\$/m <sup>3</sup>
$CER_{1,1}$ e $CER_{1,2}$ , custo energia térmica-palha/palha	27,06	R\$/MWh
$CER_{2,1}$ , custo energia mecânica-palha	54,11	R\$/MWh
$CER_{2,2}$ , custo energia mecânica-bagaço	0,00	R\$/MWh
$CER_{3,1}$ , custo energia elétrica-palha	38,46	R\$/MWh
$CER_{3,1}$ , custo energia mecânica-bagaço	10,26	R\$/MWh
$\eta RC_{3,1}$ , matriz de conversão caldo-açúcar VHP	0,17	ton/ton
$\eta RC_{3,2}, \eta RC_{3,3}$ , matriz de conversão caldo-etanol anidro e hidratado	0,11	m <sup>3</sup> /ton
$\eta RC_{4,2}, \eta RC_{4,3}$ , matriz de conversão melaço-etanol anidro e hidratado	0,49	m <sup>3</sup> /ton
$\eta RE_{1,1}$ , matriz de conversão palha-energia térmica	4,15	MWh/ton
$\eta RE_{2,1}$ , matriz de conversão bagaço-energia térmica	2,24	MWh/ton
$\eta RE_{1,2}$ , matriz de conversão palha-energia mecânica	3,04	MWh/ton
$\eta RE_{2,2}$ , matriz de conversão bagaço-energia mecânica	1,79	MWh/ton
$\eta RE_{1,3}$ , matriz de conversão palha-energia elétrica	3,64	MWh/ton
$\eta RE_{2,3}$ , matriz de conversão bagaço-energia elétrica	2,43	MWh/ton